



Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Idraulica

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE
ICEA**

**Sulla tecnica del dragaggio ambientale. Alcuni casi di studio nella
Regione Veneto**

*On the environmental dredging technique. Some case studies
in the Veneto Region.*

Laureando:
Mauro Dotto

Relatore:
Prof. Ing. Piero Ruol

ai miei genitori

*Coloro che s'innamorano di pratica senza scienza sono come nocchiero che entra
in nave senza timone o bussola che mai ha certezza dove va*

— Leonardo da Vinci

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Piero Ruol per i preziosi insegnamenti durante i due anni di laurea magistrale e per avermi dato la possibilità di approfondire un argomento così attuale.

Ringrazio sentitamente l'ing. Massimo Montevocchi della *Società Italiana Dragaggi* che mi ha fatto conoscere il tema del dragaggio e che mi ha aiutato nella stesura della tesi fornendomi parte del materiale.

Inoltre, per la parte applicativa della tesi, ringrazio l'ing. Stefano Boscolo della società *La Dragaggi*, che mi ha dato la possibilità di fare numerosi sopralluoghi nelle zone oggetto di studio, e di salire a bordo della draga *Gino Cucco* per assistere ad un ciclo di dragaggio.

Infine, ho desiderio di ringraziare con affetto i miei genitori per il sostegno ed il grande aiuto che mi hanno sempre dato in questi anni.

Sommario

Il mondo del dragaggio si è evoluto lentamente nel corso dei secoli, passando gradualmente da applicazioni basate sull'esperienza ad interventi sempre più evoluti, foraggiati da attrezzature che seguono il passo dell'evoluzione tecnologica e da progetti imperniati su modelli matematici e numerici. Da sempre obiettivo principale del dragaggio è la manutenzione della profondità navigabile nei porti o nei canali, mentre più attuali sono i temi legati alla bonifica e alla costruzione e manutenzione di gran parte delle infrastrutture marittime sulle quali si basa il benessere economico di molti paesi. L'esigenza più recente è quella di affrontare tali realtà anche dal punto di vista ambientale, in modo da mitigare gli effetti negativi legati ad ogni progetto di dragaggio. La quantità di materiale messo a disposizione da ogni intervento è notevole, motivo per cui la tendenza odierna è quella di addebitarne un utilizzo benefico, dalla realizzazione di materiali da costruzione, al ripascimento di spiagge in erosione o, alla salvaguardia delle barene, ad esempio. Vengono prese in considerazione in questo studio sia le tecniche tradizionali di dragaggio, sia quelle legate al dragaggio ambientale, visto come insieme di operazioni in successione dal progetto al trattamento finale dei sedimenti. Si presentano poi due interventi, analizzati in corso d'opera nella Regione Veneto, per dare evidenza dell'importanza del dragaggio al fine della difesa del litorale, per il primo, e ai fini della manutenzione e del consolidamento delle barene, per il secondo. Infine, data la complessità e la molteplicità dei soggetti coinvolti in questo tipo di progetti, viene proposta un'analisi dei principali riferimenti normativi nazionali ed europei inerenti al tema del dragaggio e dello scarico in mare.

Abstract

The world of dredging has evolved slowly over the centuries, gradually passing from applications based on the experience to increasing planning, made possible by equipment that follow the rate of technological evolution and by projects pivoting on mathematical and numerical models. The main objective of dredging has always been the maintenance of the navigable depth in ports or channels, while really current are the issues related to land reclamation and the construction and maintenance of most of the maritime infrastructure on which is based the economic well-being of many countries. The latest need is to address these realities also from the environmental point of view, in order to mitigate the negative effects related to each dredging project. Dredging creates large volumes of dredged material, which can be a valuable resource, used for construction materials, isolation, flood defence or for the safeguarding of sandbanks. In this study are taken into account the traditional methods of dredging, both those related to environmental dredging, seen as a set of operations in succession from design to final treatment of the sediments. Two case studies are submitted, as they were still work in progress in the Veneto Region, in order to emphasize the importance of dredging to the defense of the coast, for the first, and for the maintenance and consolidation of the salt marshes, for the second. Finally, given the complexity and multiplicity of actors involved in this type of projects, is proposed an analysis of the main national and european legal regulations related to the theme of the dredging and disposal at sea.

Indice

Sommario	iii
Abstract	v
Elenco delle figure	x
Elenco delle tabelle	xiii
Introduzione	xx
1 La difesa della costa ed i ripascimenti artificiali	1
1.1 La gestione della costa	1
1.1.1 I materiali costieri	1
1.2 Dinamica litoranea	2
1.2.1 Modellazione naturale delle spiagge sottili	2
1.2.2 Bilancio dei sedimenti in spiaggia	3
1.3 Opere di difesa dall'erosione	4
1.4 Difesa mediante apporto artificiale di sabbia alla spiaggia	5
1.5 Evoluzione nel tempo di un ripascimento	5
1.5.1 Profilo di equilibrio di una spiaggia	6
1.5.2 Larghezza della spiaggia ottenibile con ripascimento	6
1.6 Valutazione del fabbisogno effettivo di sabbia	7
1.7 Disponibilità del materiale	8
1.8 Monitoraggio	9
1.9 Caratteristiche sedimentologiche	10
2 Storia del dragaggio	11
2.1 Gli inizi	11
2.2 I secoli Europei	13
2.3 L'inizio della bonifica	13
2.4 Il porto interno di Brugges	14
2.5 Sistemi di dragaggio	14
2.5.1 Forza lavoro	14
2.5.2 Il mulino a fango	15
2.5.3 Altre macchine	16
2.5.4 Macchine a vapore e motori diesel	16
2.5.5 Le draghe idrauliche	17
2.6 Il XX secolo	17
2.7 Dragaggi ambientali	19
2.8 Il XXI secolo	20

3	Il dragaggio	21
3.1	Tipi di dragaggio	21
3.2	I terreni da dragare	23
3.3	Fasi di un progetto di dragaggio	25
3.4	Attrezzatura di dragaggio	27
3.4.1	Draghe idrauliche	28
3.4.2	Draghe meccaniche	29
3.4.3	Dragaggio per turbolenza	31
3.5	Progressi recenti nell'attrezzatura di dragaggio	33
3.5.1	Innovazioni per tutti i tipi di draghe	34
3.5.2	Innovazioni per draghe idrauliche	35
3.5.3	Innovazioni per draghe meccaniche	35
3.6	Attrezzature di trasporto	37
3.6.1	Trasporto tramite condotta	37
3.6.2	Trasporto su chiatta	37
3.6.3	Trasporto su strada	39
3.7	Tecniche di deposito	39
3.7.1	Deposito a terra	39
3.7.2	Deposito in mare	40
4	Materiale dragato come risorsa	43
4.1	Domanda ed offerta	44
4.2	Tipologie di materiali impiegabili	46
4.3	Uso ingegneristico del materiale dragato	47
4.3.1	Materiali da costruzione	47
4.3.2	Isolamento	47
4.3.3	Protezione dei litorali e dalle inondazioni	47
4.3.4	Sistemazioni di sponda	50
4.3.5	Ripascimenti	50
4.3.6	Costruzione di argini	51
4.3.7	Costruzione di barriere sommerse	51
4.3.8	Realizzazione di barene	52
4.4	Uso ambientale del materiale dragato	52
4.5	Metodi di dragaggio e di deposito collegati all'uso	53
4.5.1	Metodi specifici per l'utilizzo del materiale dragato	55
4.6	Analisi di costi e benefici	56
4.6.1	Costi	57
4.6.2	Benefici	58
5	Dragaggio ambientale	59
5.1	Inquadramento	59
5.2	Obiettivi e processi	59
5.3	Strategie di gestione	61
5.4	Valutazioni iniziali	64
5.4.1	Aspetti che favoriscono il dragaggio	65
5.4.2	Vantaggi e limiti del dragaggio ambientale	65
5.4.3	Dragaggio ambientale, componente del ciclo di rimozione dei sedimenti	66
5.4.4	Studi pilota	68
5.5	Valutazioni sulle caratteristiche del sito e dei sedimenti	69
5.5.1	Condizioni del sito	69
5.5.2	Caratterizzazione dei sedimenti	75

5.5.3	Requisiti di rimozione	78
5.6	Attrezzature di dragaggio ambientale	80
5.6.1	Disc bottom dredger	80
5.6.2	Sweep dredger	81
5.6.3	Environmental auger dredger	82
5.6.4	Scraper dredger	83
5.6.5	Environmental grab dredger	84
5.6.6	Scoop dredger	85
5.6.7	Cable arm bucket	86
5.6.8	Pneumatic dredgers	87
5.7	Metodi per stimare la risospensione, i residui e la diffusione	89
5.7.1	Risospensione dei sedimenti	89
5.7.2	Residui	93
5.7.3	Rilascio di contaminanti	95
5.8	Metodi di controllo	100
5.8.1	Misure di controllo per la risospensione	100
5.8.2	Misure di controllo per il rilascio di contaminanti	104
5.8.3	Misure di controllo per i residui	105
5.9	Discarica in mare - Open water disposal	105
5.9.1	Comportamento del materiale durante e dopo lo scarico	106
5.9.2	Valutazione dell'impatto fisico e dei contaminanti	107
5.9.3	Misure di controllo	109
5.10	Vasche di colmata - CDF (<i>Confined disposal facilities</i>)	112
5.10.1	Comportamento del materiale dragato	114
5.10.2	Caratteristiche del sito	115
5.10.3	Altri usi dei CDF durante e dopo l'utilizzo	117
5.11	Trattamento	118
5.11.1	Pre-trattamento	119
5.11.2	Trattamenti fisico-chimici	120
5.11.3	Trattamenti biologici	120
5.11.4	Trattamenti termici	121
5.11.5	Trattamenti elettrocinetici	121
5.11.6	Trattamenti di immobilizzazione	122
6	Caso di studio I: ripascimento in località Cortellazzo (VE)	123
6.1	Premessa	123
6.2	Inquadramento territoriale	124
6.3	Obiettivi	124
6.4	Ripascimento mediante TSHD	125
6.5	Intervento ambientale: salvaguardia delle colonie bentoniche	126
6.6	Analisi granulometrica	127
6.6.1	Vagliatura meccanica per via secca	128
6.7	Prelievo e campionamento nella zona oggetto di studio	129
6.8	Analisi granulometrica dei campioni	130
7	Caso di studio II: dragaggio canaletta di accesso al Porto di Lido e refluentamento in barena S.Felice	139
7.1	Premessa	139
7.2	Ambito territoriale	140
7.3	Inquadramento territoriale	142
7.3.1	Descrizione morfologica della laguna	144
7.3.2	Caratterizzazione sedimentologica	147

7.3.3	Sistema idrico	148
7.4	Dragaggio della canaletta di accesso al Porto di Lido (VE)	149
7.4.1	Ciclo di dragaggio	150
7.5	Ripristino barena di San Felice	155
7.5.1	Fasi del refluimento in barena San Felice	156
8	Analisi dei costi	159
8.1	Stima dei tassi di produzione operativi	159
8.1.1	Metodi per stimare il tasso di produzione operativo	159
8.1.2	Tassi di produzione per dragaggio meccanico sulla base di parametri operativi	160
8.1.3	Tassi di produzione per dragaggio idraulico sulla base di parametri operativi	160
8.2	Stima del tasso di produzione sostenuto	161
8.3	Durata del progetto e numero di draghe	162
8.4	Costi standard	163
8.4.1	Principi base dei costi standard	163
8.4.2	Tabelle dei costi standard	165
8.4.3	Esempio di calcolo per draga aspirante semovente	171
8.4.4	Esempio di calcolo per draga aspirante con disgregatore	172
8.5	Prezzi unitari di riferimento	173
9	Contesto normativo	175
9.1	Quadro di riferimento internazionale	175
9.2	Quadro di riferimento comunitario	182
9.3	Quadro di riferimento nazionale	183
	Conclusioni	189
	Bibliografia	193

Elenco delle figure

1	Strumento per cavare terra, Draga lagunare di Leonardo da Vinci .	xviii
2	Bucket Dredge, cartolina pubblicata da J. E. McDonald, Chandler-ville, Illinois, 25 maggio 1909 Illinois State Museum Collection . . .	xviii
3	Draga semovente, 1939, Meredosia River Museum Collection, Meredosia, Illinois	xix
1.1	Schematizzazione spiaggia	3
1.2	Bilancio sedimenti nella zona litoranea	4
1.3	Arretramento profilo dovuto all'aumento differenziale del livello del mare medio	6
1.4	Variazione del parametro di scala A con la dimensione del sedimento e la velocità di sedimentazione (<i>Dean, 1987</i>)	7
1.5	Tre generici tipi di profili di ripascimento	8
2.1	Draga manuale	12
2.2	Mulino a fango <i>Amsterdam</i>	15
2.3	Schema della <i>Lavaca</i> , draga semovente a vapore costruita a Louisville, Kentucky, nel 1847	17
2.4	Porto di Amburgo	18
2.5	Aeroporto internazionale di Kansai, Giappone	19
3.1	Trasporto del materiale dragato	27
3.2	Draga stazionaria aspirante	28
3.3	Draga aspirante con disgregatore	29
3.4	Draga con testa aspirante a strascico	29
3.5	Draga a secchie	30
3.6	Draga a cucchiaio	31
3.7	Draga a benna mordente	31
3.8	Draga ad iniezione idraulica	32
3.9	Draga a vomero subacqueo	33
3.10	Benna a schermo	36
3.11	Esempio di trasporto tramite condotta	38
3.12	Esempio di trasporto su chiatta	38
3.13	Zona confinata per il deposito del materiale dragato	40
3.14	Sistema di diffusione subacqueo	41
4.1	Uso del materiale dragati in Giappone	45
4.2	Risultati del questionario del CEDA sull'uso del materiale dragato in Europa, Aprile 2005	45
4.3	Volgermeerpolder, più grande sito di smaltimento dei rifiuti nei Paesi Bassi, Amsterdam	50
4.4	Utilizzazione del materiale dragato per la sistemazione di sponda .	50

4.5	Ripascimento	51
4.6	Utilizzazione del materiale dragato per la realizzazione di un argine, Rostock (Germania)	51
4.7	Superfici di barena nella laguna veneziana	52
4.8	Il ciclo di sequenze dal dragaggio all'uso	54
5.1	Schematizzazione di dragaggio ambientale e relativi processi	60
5.2	Diagramma di flusso per la strategia organizzativa, I	62
5.3	Diagramma di flusso per la strategia organizzativa, II	63
5.4	Esempio di diagramma di flusso per le fasi in un dragaggio	67
5.5	Esempio di traccia di un'indagine acustica	72
5.6	Linea guida per la stabilità delle strutture litoranee	73
5.7	Immagini di sonar a scansione	73
5.8	Esempi di risultati del sondaggio magnetico	74
5.9	Esempi di attrezzature di campionamento	76
5.10	Groviglio di cavi sulla testa tagliente	79
5.11	Esempio di Disc bottom dredger	81
5.12	Esempio di Sweep dredger	82
5.13	Esempio di Environmental auger dredger	83
5.14	Esempio di Environmental grab dredger	85
5.15	Esempio di Scoop dredger	85
5.16	Cable Arm's Environmental Clamshell	87
5.17	Sistema di pompe Pneuma	88
5.18	Passaggi multipli della draga per la rimozione dei residui	94
5.19	Esempi di cofferdam	101
5.20	Esempi di geotubi	101
5.21	Esempi di palancole	102
5.22	Esempi di silt curtains/screens	102
5.23	Opzioni per il deposito in mare: A: libero; B-C: con contenimento laterale; D: copertura sul fondo; E-F: deposito acquatico contenuto	106
5.24	Comportamento del materiale come funzione del metodo di scarico	107
5.25	Diverse realizzazioni di capping negli USA	109
5.26	Schema capping	110
5.27	Fattore di capacità portante per diversi spessori di sabbia in funzione della resistenza a taglio del terreno in condizioni non drenate . . .	112
5.28	Opzioni per vasche di colmata	113
5.29	Sezione tipo di diga per CDF con strato filtrante	114
5.30	Esempi di sezioni correttive per CDF	115
5.31	Diagramma schematico di un CDF attivo	116
5.32	Diagramma schematico di un idrociclone	119
5.33	Installazione di elettrodi in un bacino per l'elettrocinesi	121
6.1	Inquadramento della zona di intervento	124
6.2	Fase di refluentamento	126
6.3	Esempio di draga idraulica	126
6.4	Apparecchiature del dipartimento ICEA, sede GEOMAR, dell'Uni- versità degli Studi di Padova	129
6.5	Campionatore utilizzato per il prelievo	129
6.6	Campionatore di tipo <i>Shelby</i>	130
6.7	Aree di prelievo nella zona di intervento tra Jesolo e Cortellazzo . .	131
6.8	Curva granulometrica campione 1	134
6.9	Curva granulometrica campione 2	135

6.10	Curva granulometrica campione 3	136
6.11	Curva granulometrica campione 4	137
6.12	Curva granulometrica campione 5	138
7.1	Differenza tra barena, velma e bassofondo in funzione del livello di marea	139
7.2	Localizzazione area di progetto - dragaggio	141
7.3	Localizzazione area di progetto - riversamento	143
7.4	Carte batimetriche della Laguna di Venezia 1930 - 1970 - 2000, Magistrato alle Acque	145
7.5	Sintesi delle superfici barenali scomparse negli ultimi due secoli . .	146
7.6	Variazione delle superfici di barena dal 1930 al 2002	147
7.7	Foto aerea del 1955 e foto satellitare del 2002 a confronto	148
7.8	Andamento velocità di corrente con modello idrodinamico bidimen- sionale agli elementi finiti	150
7.9	Intervento di manutenzione del fondale della canaletta di accesso al porto di Lido	151
7.10	TSHD utilizzata per il dragaggio della canaletta di accesso al Porto di Lido	151
7.11	Area di dragaggio	152
7.12	Abbassamento della condotta con drag head	152
7.13	Fasi di riempimento della tramoggia	153
7.14	Fase di refluimento a scarico diretto	154
7.15	Disgregazione e diluizione del materiale in tramoggia	155
7.16	Barena di San Felice	156
7.17	Arginello perimetrale	157
7.18	Inizio fase di refluimento	157
7.19	Fasi di refluimento intermedie	158
7.20	Fase finale del refluimento	158

Elenco delle tabelle

3.1	Criteri generali per l'identificazione e la classificazione dei terreni da dragare	24
3.2	Principali differenze tra il dragaggio idraulico e quello meccanico .	32
3.3	Valutazione qualitativa tra il dragaggio idraulico e quello meccanico	33
4.1	Volumi annui di materiale dragato in Europa Mm^3	45
4.2	Proprietà rilevanti del terreno dragato in funzione della destinazione d'uso	48
4.3	Selezione del materiale dragato per usi ingegneristici	49
5.1	Resistenza del terreno necessaria a seconda del fattore di capacità portante	111
6.1	Tabella dei setacci relativi alla normativa italiana, americana ed inglese	128
6.2	Analisi granulometrica del campione n. 1	131
6.3	Analisi granulometrica del campione n. 2	132
6.4	Analisi granulometrica del campione n. 3	132
6.5	Analisi granulometrica del campione n. 4	133
6.6	Analisi granulometrica del campione n. 5	133
7.1	Coordinate barena	142
7.2	Ciclo produttivo della draga	155
8.1	Costi standard per draga aspirante semovente	166
8.2	Costi standard per draga aspirante con disgregatore	167
8.3	Costi standard per draga a cucchiaio	168
8.4	Costi standard per chiatta semovente	168
8.5	Costi standard per rimorchiatore	169
8.6	Costi standard per condotte a terra (lunghezza standard = 12 m)	169
8.7	Costi standard per valvole	170
8.8	Costi standard per tubi di raccordo	170
8.9	Costi standard per condotte sommerse	171
9.1	Elenco delle principali convenzioni internazionali	175
9.2	Elenco dei principali riferimenti normativi europei	182
9.3	Elenco dei Siti di interesse nazionale	185
9.4	Elenco dei Siti di interesse nazionale che tornano siti di interesse regionale	186
9.5	Elenco dei principali riferimenti normativi nazionali e linee guida .	187

Introduzione

Le operazioni di dragaggio, specie in ambito portuale, risalgono a tempi antichi: si ritiene che i Fenici furono costretti a lasciare le isole dell'Egeo e a trovare nel Mediterraneo più accoglienti punti d'approdo per le loro navi, a causa dell'insabbiamento dei loro porti d'origine, oggi difficilmente riconoscibili a causa del loro completo interrimento.

Fatti analoghi si ebbero per molti porti romani e medievali: i porti di Traiano e Claudio, quelli di Pisa e Palermo, il porto di Classe a Ravenna ed altri ancora, oggi completamente sepolti dalle sabbie e distanti chilometri dal mare.

Il lavoro di dragaggio dei porti per molti secoli è stato risolto con il sistema *Bag and Spoon* (sacca e cucchiaio) di origine romana, perfezionato dagli olandesi nel XV-XVI secolo. Tale sistema prevedeva un cucchiaio con un lungo manico manovrato a mano mediante cavi: esso penetrava nel terreno, si riempiva, veniva sollevato e vuotato, scaricando in una sacca o contenitore il materiale scavato. L'apparecchiatura, installata su piccole barche, era azionata da due uomini ed evidentemente la capacità di scavo era molto limitata. Utilizzando però la forza lavoro degli schiavi, furono realizzate comunque grandi opere di dragaggio, dai Faraoni¹, dagli Imperatori della Cina² e ai tempi dell'Impero Romano³ per la costruzione di numerosi canali, di cui alcuni destinati alla navigazione.

Si hanno notizie di un dragatore genovese incaricato nel '400 dal porto di Marsiglia, come anche di maestri veneziani operanti numerosi, nel dragaggio dei porti dell'Adriatico ai tempi della Serenissima. Anche Leonardo ha progettato alcune draghe. Altre specie di attrezzature usate fra i secoli XVI e XVII, come le norie⁴ azionate da cavalli, non hanno prodotto miglioramenti sostanziali.

La scarsa produttività di tali vecchi mezzi rese, pertanto, non economico eseguire, nel passato, dragaggi di notevole entità, il che costringeva, come già visto, all'abbandono dei porti che subivano interrimenti notevoli.

Le cose sono cambiate solo quando è stato possibile sostituire il lavoro delle braccia o dei cavalli con altre sorgenti di energia. Ed infatti, il dragaggio meccanico, nato alla fine del '700, si è sviluppato nel corso del secolo XIX, il secolo del vapore, grazie anche all'introduzione della costruzione metallica delle navi.

Sin dalla rivoluzione industriale l'umanità ha interferito con l'ambiente con un tasso via via crescente e la nostra passata mancanza di capire e apprezzare

¹Il Faraone Sisostri III fu ricordato come 'il re che costruisce canali'; Neco II progettò il gran canale che univa il Mar Rosso al Mediterraneo.

²Kubilai Kan, il conquistatore mongolo, ricostruì e ripulì il gran canale navigabile, come riferisce Marco Polo.

³Nerone mobilitò una moltitudine di schiavi per realizzare l'idea di aprire il canale di Corinto.

⁴Macchina per sollevare acqua e materiali incoerenti (come sabbie, cereali), che consta di una serie di secchie fissate a distanze uguali su una catena o su un nastro senza fine, mosso e guidato da pulegge: le tazze si riempiono in basso, pescando nell'acqua e, passando sulla puleggia superiore, rovesciano il loro contenuto in una tramoggia che lo raccoglie

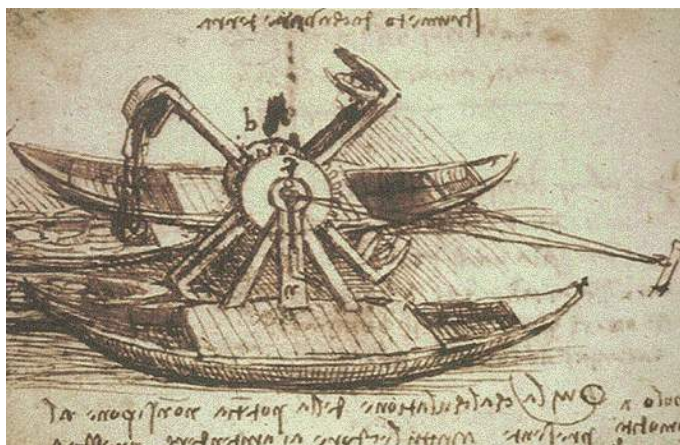


Figura 1: Strumento per cavare terra, Draga lagunare di Leonardo da Vinci

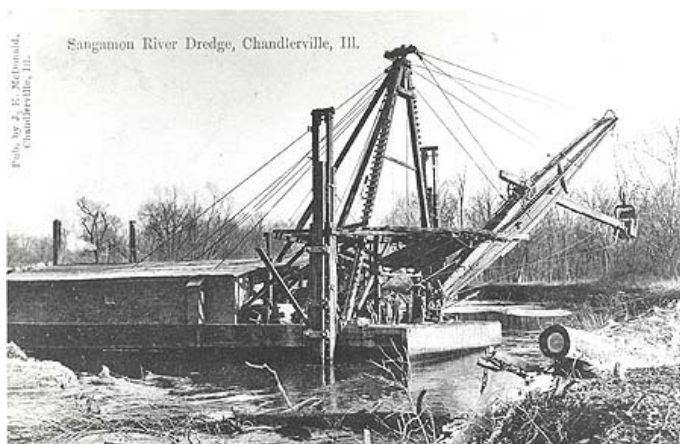


Figura 2: Bucket Dredge, cartolina pubblicata da J. E. McDonald, Chandlerville, Illinois, 25 maggio 1909 Illinois State Museum Collection

l'ambiente ci ha portati ad un punto in cui questa interferenza si sta manifestando in modi che non possono più essere ignorati.

Studi fatti su scala mondiale hanno mostrato che, se vogliamo garantire il futuro della nostra esistenza dobbiamo mostrare più responsabilità verso come viviamo e ci comportiamo nei confronti dell'ambiente: facendo crescere consapevolezza e preoccupazione pubbliche si agevola questo scopo.

Il dragaggio è un'attività necessaria allo sviluppo umano, in una visione corretta può essere anche un utile strumento per rimediare agli errori ambientali fatti in passato. Comunque, la vera natura del dragaggio, con il suo scavo e riposizionamento del materiale, è causa di un forte impatto ambientale.

Questo pertanto è il motivo per cui dobbiamo essere capaci di determinare se un certo tipo di progetto di dragaggio abbia un effetto positivo o negativo sull'ambiente: la valutazione dell'impatto ambientale dovrebbe esaminare sia gli effetti a breve che a lungo termine, come la sostenibilità dell'ambiente alterato.

Nella sua forma più semplice il dragaggio consiste nello scavo di materiale dal mare, laghi o fiumi e nel riposizionamento dello stesso altrove. È comunemente usato per aumentare la profondità navigabile nei porti, nei canali navigabili o per estrarre minerali da giacimenti sottomarini, ma può essere usato anche per migliorare il drenaggio, bonificare, aumentare le difese marine. Quando si usano le tecniche di dragaggio bisogna essere consapevoli degli effetti dei cambiamenti



Figura 3: Draga semovente, 1939, Meredosia River Museum Collection, Meredosia, Illinois

che tentiamo di raggiungere, come degli effetti dell'attività stessa del dragaggio. Alcuni effetti possono includere:

- alterazione della morfologia fluviale o costiera, aumento o perdita di tranquillità, aumento o riduzione dell'habitat naturale;
- alterazione delle correnti e delle caratteristiche delle onde, che possono avere effetti sulla navigazione, sulle difese costiere;
- miglioramento o peggioramento della qualità dell'acqua;
- miglioramento o peggioramento delle condizioni di lavoro dovute allo sviluppo industriale.

L'attività di dragaggio stessa influenza l'ambiente spesso in misura minore nel lungo periodo rispetto a ciò che accade nel breve termine.

Gli effetti ambientali legati al dragaggio possono includere nel breve termine aumenti nella torbidità, ossia sospensione dei sedimenti nelle vicinanze, dovuti al processo di escavazione, all'eccesso di materiale caricato che quindi ricade in mare, alla perdita di materiale dragato dalle tramogge o dalle condotte durante il trasporto. Nell'area di stoccaggio o refluimento possono poi esserci incrementi nel livello della torbidità o perdita di fauna bentonica. Spesso i livelli di torbidità causati dalle attività di dragaggio non sono molto maggiori di quelli causati dalle grandi navi commerciali o dalle operazioni di pesca a strascico sul fondo del mare o perfino di quelli dovuti alle intense mareggiate ma ciò è difficile da dimostrare senza studi specifici.

L'ambiente marino è un insieme complesso di fenomeni e caratteri naturali e questo rende complicata la previsione degli effetti dei cambiamenti apportati dall'uomo nelle attività a breve termine. Indagini globali e specifiche delle caratteristiche ambientali sono spesso un requisito fondamentale per ogni progetto di dragaggio, assieme alla valutazione di tutti i potenziali pro e contro.

La mancata attenzione passata nei confronti dei problemi ambientali si è riversata in molti fiumi, porti e bacini delle nazioni industrializzate, caratterizzati da materiali che sono stati contaminati da indesiderabili livelli di composti metallici e chimici; qualora si vada a dragare in queste zone, i contaminanti possono essere rilasciati nella colonna d'acqua e quindi entrare nella catena alimentare. In questo

modo gli effetti ambientali del dragaggio e del riposizionamento del materiale saranno piú preoccupanti e serviranno quindi analisi ancora piú dettagliate.

In certi casi é l'esistenza stessa del materiale inquinato a richiedere il dragaggio: l'ambiente viene riqualificato rimuovendo il materiale inquinato e stoccandolo in aree adeguate e sicure. I miglioramenti a lungo termine però si ottengono di sicuro prevenendo o bloccando le fonti di inquinamento alla base.

Il trattamento e lo stoccaggio di questi materiali inquinati é materia molto complessa che richiede studi dettagliati. Esiste oggi una struttura internazionale in merito alla legislazione in materia che é stata devoluta alle agenzie governative a livello nazionale; essa é in continuo cambiamento in quanto la conoscenza scientifica aumenta e le strutture attuative si sono evolute. Tutti gli attori nel panorama dei dragaggi devono essere al corrente di questa legislazione.

Un ulteriore effetto positivo del dragaggio, che é attivamente incoraggiato dalle autorità di controllo é l'uso benefico del materiale dragato, incluso parte di quello contaminato. Tipici esempi sono quelli relativi al ripascimento per la difesa delle spiagge, alla creazione di zone umide, alla bonifica di territori ad uso commerciale od industriale ed al miglioramento dei terreni agricoli.

Il dragaggio di sedimenti contaminati ha visto negli ultimi anni un sviluppo tecnologico molto spinto.

I motivi risiedono principalmente nell'impatto socio-economico dei trattamenti necessari per consentire il riuso o la messa a dimora definitiva del materiale.

Il reperimento di aree di stoccaggio provvisorio, la preparazione di esse, la realizzazione di adeguati impianti di trattamento, il costo stesso del trattamento ed infine la difficoltà di reperire aree di deposito permanente, ma anche soluzioni che consentano il riuso, hanno spinto gli operatori del settore a cercare di minimizzare i volumi da considerare contaminati, discriminando il diverso livello o specificità dell'inquinamento, in una parola, ad eseguire i dragaggi in modo *selettivo*.

Dragaggio selettivo, ma non solo, anche eliminazione della torbidità e della migrazione degli inquinanti durante l'operazione di scavo, minimo arricchimento di acqua per non dover poi trattare, oltre ai fanchi scavati, anche l'acqua di risulta.

Capitolo 1

La difesa della costa ed i ripascimenti artificiali

1.1 La gestione della costa

Una costa é il limite tra la terraferma e la massa acquea marina, inteso non come linea, ma come la zona, in parte emersa, in parte sommersa, nella quale agiscono il moto ondoso e le maree. Essa ha per lo piú andamento sinuoso e la pendenza varia da una conformazione pressoché verticale (*costa alta*) ad una quasi orizzontale (*costa bassa*); in quest'ultimo caso il pendio scende gradatamente, si possono formare depositi sabbiosi e qui si genera la spiaggia. La dinamica della zona costiera é determinata da un delicato equilibrio sotto l'azione di processi naturali o indotti dall'uomo, pertanto, i problemi che attengono all'uso del territorio costiero richiedono un'attenta pianificazione. Notevoli sono le attività economiche legate a queste zone: ricerca di risorse biologiche, minerali, turismo, pesca artigianale o industriale, complessi industriali e commerciali collegati all'attività dei porti. La gestione della zona costiera deve guardare allora a tutti gli aspetti economici, compresi quelli ambientali, confrontarli e verificare la loro compatibilità, scegliendoli in base all'ottimizzazione dei risultati.

1.1.1 I materiali costieri

I materiali che costituiscono le coste sono classificati in base alla granulometria e possono essere classificati in due categorie:

- i materiali mobili, che possono essere movimentati dall'azione del mare (ciottoli, sabbie, limi);
- i materiali fissi, sui quali l'azione del mare si riduce ad un'erosione (rocce e falesie).

La ricerca dell'origine dei materiali costieri é un importante elemento di studio del regime della costa. I materiali possono essere di origine terrigena o pelagica, i primi possono provenire:

- dal fondo al largo;
- dall'erosione delle coste vicine;
- dagli apporti fluviali.

I principali metodi utilizzati per studiare i movimenti dei materiali di fondo e per determinare l'origine dei diversi sedimenti sono i seguenti:

- **globale** - consiste nella valutazione dei volumi apportati o prelevati nelle diverse zone in rapporto ad un piano di riferimento. È possibile valutare anche globalmente gli apporti e le erosioni per avere un'idea d'insieme del fenomeno. Il metodo però non permette sempre di analizzare il trasporto solido con dettaglio;
- **analitico** - consiste nell'analisi tessiturale dei sedimenti e nel confronto delle varie curve granulometriche; nell'esame dell'abrasione e della modificazione della forma subita dai materiali insieme all'indice di appiattimento¹; nell'esame della modifica della composizione mineralogica; nell'individuazione degli spostamenti dei materiali mediante traccianti colorati.

1.2 Dinamica litoranea

L'insieme dei fenomeni che determinano il movimento dei sedimenti nella parte attiva della spiaggia (emersa o sommersa), rappresenta l'aspetto principale della fase evolutiva riguardante i processi di dinamica litoranea. Tali movimenti sono imputabili all'azione del vento e delle maree sulla spiaggia emersa, mentre la dinamica della spiaggia sommersa è legata alle azioni del moto ondoso, prima e dopo il frangimento, e delle correnti generate dalla trasformazione del processo di moto da oscillatorio a traslatorio. Tra le correnti generate dall'onda, hanno un ruolo fondamentale le correnti di trasporto di massa (nella zona fuori dal limite dei frangenti) e le correnti che si originano dal fenomeno di frangimento delle onde (nella zona compresa tra quella dei frangenti e la battigia). Il moto ondoso determina quindi l'inizio del movimento e la messa in sospensione delle particelle di sabbia, mentre le correnti costituiscono il veicolo che le trasporta.

1.2.1 Modellazione naturale delle spiagge sottili

Il movimento del sedimento di spiaggia causato dal moto ondoso, per semplicità, viene schematizzato distinguendo tra trasversale e longitudinale anche se, i due tipi di trasporto si presentano quasi sempre simultaneamente, con una maggiore o minore prevalenza di uno dei due a seconda dell'angolo formato dal fronte delle onde incidenti con la linea di battigia. Movimenti trasversali sono quelli che si hanno normalmente alla linea di riva, longitudinali quelli paralleli alla riva stessa. Con il termine *spiaggia* si indica comunemente la zona che si estende tra il livello più basso della marea e il limite superiore, nel quale si sentono gli effetti dinamici del moto ondoso. In realtà, nell'accezione ingegneristica del termine spiaggia, ci si riferisce anche al tratto più al largo sul cui fondale sono comunque percepibili gli effetti del modellamento del moto ondoso.

Si indentificano due zone:

- *offshore*, quella che, partendo dal limite esterno dei frangenti, va verso riva;
- *surfzone*, la zona dei frangenti compresa dal suddetto limite e la linea di riva.

L'estensione di una zona dei frangenti è generalmente ben definita in relazione all'altezza e al periodo delle onde che arrivano alla spiaggia. Infatti, le onde che provengono dal largo raggiungono i fondali più bassi in prossimità della costa, diventano più lente a causa dello shoaling, quindi più corte e alte. Questo fa

¹dato dal rapporto fra larghezza più lunghezza e spessore; è un indice della distanza del trasporto subito dal materiale

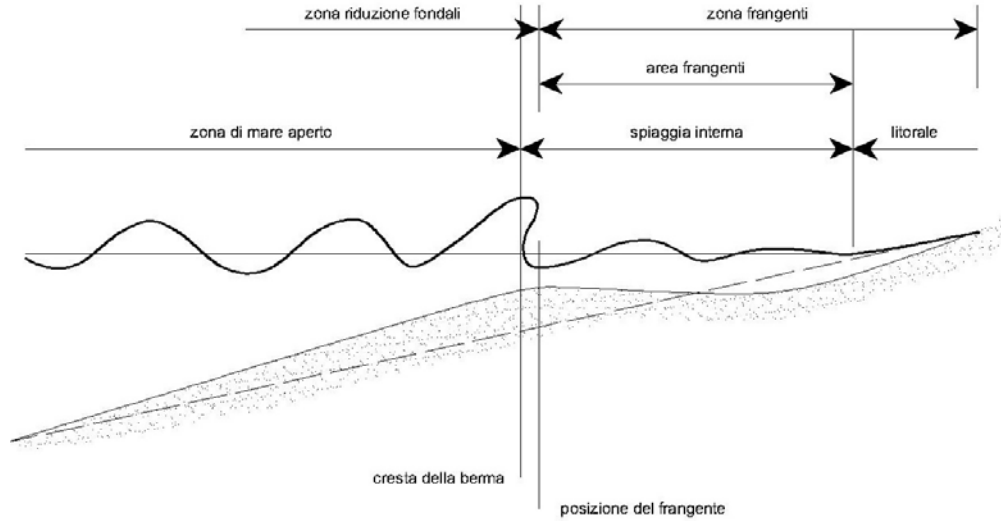


Figura 1.1: Schematizzazione spiaggia

aumentare la loro ripidità così che esse frangono appena raggiungono il limite di stabilità. Le onde raramente raggiungono la costa con direzione parallela alla sua linea; quando esse arrivano obliquamente sono rifratte non appena cominciano a risentire degli effetti del fondo; la condizione che identifica le acque basse é data dall'eq. 1.1

$$d < 0.5 L_0 \quad (1.1)$$

con:

$$\begin{cases} d = \text{profondità} \\ L_0 = \text{lunghezza d'onda in acque profonde} \end{cases}$$

Le creste d'onda diventano allora più allineate con la riva e le loro direzioni tendono a disporsi normalmente a riva; sono ancora un pó inclinate rispetto alla riva quando frangono, così che l'onda risultante ha una componente lungo riva.

1.2.2 Bilancio dei sedimenti in spiaggia

L'esame delle condizioni di un tratto di spiaggia presuppone la verifica del bilancio del volume dei sedimenti (perdite e apporti) ad esso relativo, cioè la valutazione dei sedimenti trasportati, erosi o depositati per un dato volume di controllo. Occorre tenere conto anche del trasporto dovuto al vento, della produzione carbonatica, del ripascimento artificiale e dei materiali eventualmente dragati, nonché degli eventuali apporti fluviali. Va considerato anche il fenomeno della diffrazione, presente soprattutto in baie chiuse e nei porti, il quale provoca correnti dette *diffraction currents*, dirette dalle zone esposte a quelle più riparate. Esse, di non trascurabile importanza in alcuni posti, sono la causa del trasporto dei sedimenti nelle zone più interne fino a che l'effetto del riempimento compensa l'effetto delle correnti di diffrazione, raggiungendosi qui un nuovo equilibrio del fondo. É possibile valutare un bilancio attendibile delle perdite e degli apporti all'interno di una sezione di controllo, riferito ad un intervallo temporale sufficientemente lungo, guardando al complessivo continuo scambio di materiale fra la zona interna ed esterna al limite di frangimento e al più lento movimento di materiali lungo riva. Quando gli apporti sono pari alle perdite la spiaggia é detta in *regime* e in questo caso non vi sono cambiamenti per il profilo di spiaggia. Nel caso in cui invece la spiaggia sia investita obliquamente dalle onde di mare

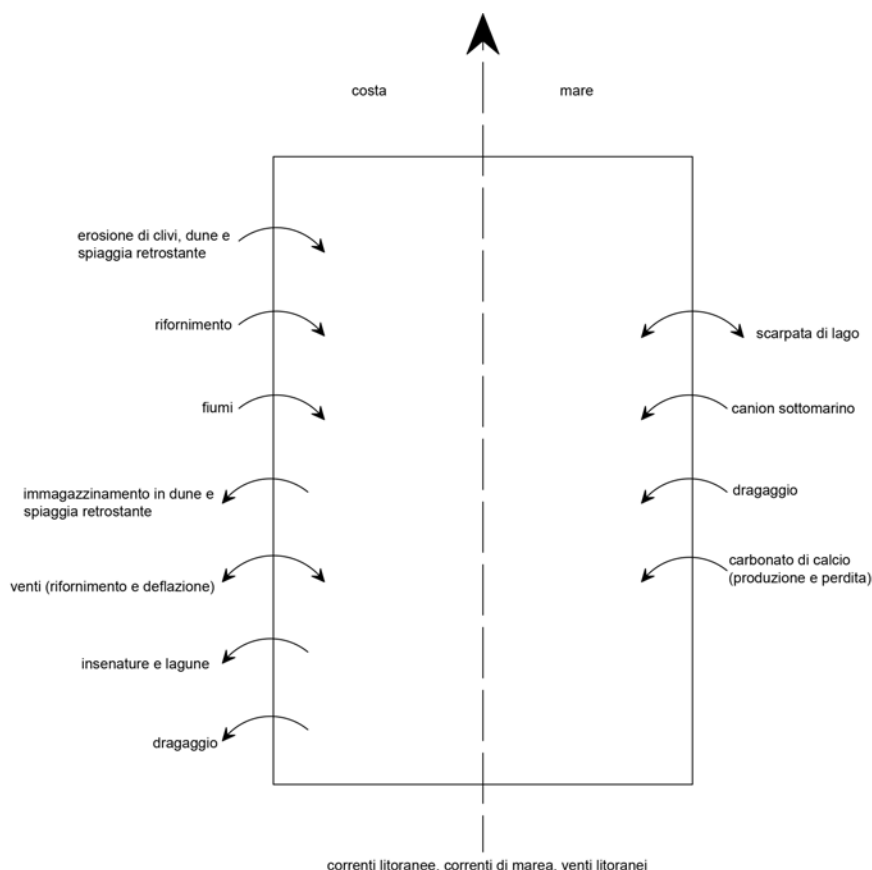


Figura 1.2: Bilancio sedimenti nella zona litoranea

morto, che trasportano sottoflutto più materiale di quello che apportano, si ha che l'area esterna alla zona dei frangenti viene erosa al fondo per fornire il materiale necessario alla ricostituzione della zona più vicina a riva e, in questo modo, i fondali risultano più profondi e ripidi.

1.3 Opere di difesa dall'erosione

Le opere di difesa della costa dall'erosione causata dalle onde possono essere distinte in naturali ed artificiali: tra le prime vanno ricordate le spiagge e le dune, mentre le seconde possono essere classificate in protettive, la cui funzione principale è quella di impedire l'azione erosiva dell'onda e di sostenere il terreno a tergo mediante il rivestimento, e in opere di rifornimento artificiale di sabbia alla spiaggia per controbilanciare le perdite causate dai processi naturali o da interventi dell'uomo. Le opere del primo tipo vengono anche inserite tra le strutture cosiddette dure o pesanti, *hard*, mentre le seconde sono dette morbide o leggere, *soft*. Esistono poi altri tipi di difesa, intermedi, in cui le componenti delle rigide e delle morbide si mescolano in vario modo, producendo strutture di difesa talvolta molto complesse (pennelli, barriere frangiflutti, etc.). Le opere di difesa sopra menzionate si propongono di impedire l'arretramento della linea di riva, o di favorirne l'avanzamento, ma non sempre può essere sufficiente per una corretta gestione del litorale, soprattutto a lungo termine. In particolare, le opere di difesa di tipo rigido ed intermedio, sono usate per modificare il bilancio sedimentario dei litorali limitando l'entità del deficit intrappolando i sedimenti in transito o riducendo l'energia incidente sulla spiaggia. Le difese di tipo morbido

invece, consistono nell'incrementare l'input sedimentario con il versamento di nuovi materiali in vari punti del profilo di spiaggia.

La sabbia diventa quindi la risorsa fondamentale anche se non resta a lungo sull'arenile perché il moto ondoso la sposta su quelli limitrofi garantendone l'equilibrio.

1.4 Difesa mediante apporto artificiale di sabbia alla spiaggia

Il principale sistema fra le strutture di difesa della spiaggia è quello del versamento artificiale della sabbia, ovvero il ripascimento. Esso rappresenta il mezzo di difesa più idoneo il cui impiego, limitato quasi unicamente alla disponibilità di cave nelle vicinanze (a terra o in mare al largo), ha il vantaggio di realizzare una buona ed efficiente difesa della linea di riva.

Questo tipo di intervento non risolve il problema dell'erosione alla radice e quindi deve essere periodicamente ripetuto per equilibrare le perdite naturali di sabbia causate dall'azione dell'onda. Solitamente si studia la fattibilità di distribuire meccanicamente o idraulicamente la sabbia su una spiaggia in erosione per riparare o formare un'adeguata spiaggia protettiva sulla quale poi possono essere installate opere ausiliarie, quali i pennelli, per conservare l'equilibrio della stessa.

Il ripascimento può essere ottenuto anche stoccando del materiale adatto sopraflutto in modo da utilizzare i naturali processi di trasporto lungoriva per distribuire il materiale lungo la spiaggia.

Un inconveniente di carattere ambientale può derivare dall'aumento temporaneo della torbidità, almeno nella fase iniziale, specie quando la percentuale di materiale fine sia elevata. Nel progetto di un ripascimento due sono i controlli da fare circa il successivo naturale trasporto della sabbia fuori dall'area del versamento:

1. controllo del comportamento del profilo trasversale della sabbia, ossia il profilo di equilibrio;
2. controllo dell'evoluzione della battigia sotto l'effetto della corrente lungoriva.

Dall'analisi congiunta di questi due aspetti dell'equilibrio dinamico della spiaggia, si possono ottenere indicazioni sulla qualità e quantità del materiale da versare, sull'avanzamento della battigia, sul costo e ottimizzazione dell'intervento.

1.5 Evoluzione nel tempo di un ripascimento

L'evoluzione di un intervento di ripascimento è il risultato del trasporto longitudinale e trasversale dei sedimenti; nel semplice caso di una costa lunga e dritta, le scale temporali associate all'equilibrio del profilo trasversale e di quello della forma planimetrica sono diverse e valutabili nell'ordine di due, tre anni e di decenni, rispettivamente.

Si assume pertanto nel calcolo che la modifica del profilo trasversale della spiaggia avvenga istantaneamente, mentre l'equilibrio evolutivo della linea di riva viene riferito alla sua più lunga scala temporale.

1.5.1 Profilo di equilibrio di una spiaggia

Nel caso in cui il materiale apportato sia simile a quello già presente in sito, la larghezza aggiuntiva di spiaggia, é data dall'eq. 1.2:

$$\Delta y_0 = \frac{V}{h_* + B} \quad (1.2)$$

con:

$$\begin{cases} V = \text{volume di riempimento per unità di lunghezza della spiaggia} \\ h_* + B = \text{dimensione verticale del profilo attivo} \\ h_* = \text{profondità di moto attivo} \\ B = \text{altezza della berma attiva} \end{cases}$$

Nel caso in cui il materiale originario sia diverso da quello apportato, la larghezza

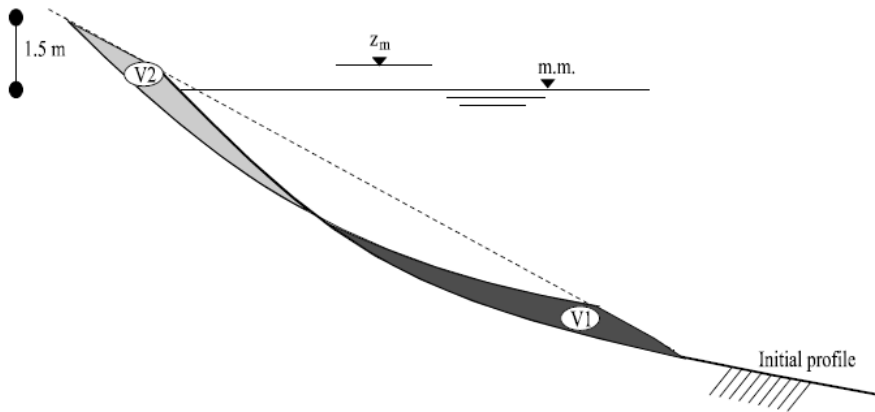


Figura 1.3: Arretramento profilo dovuto all'aumento differenziale del livello del mare medio

aggiuntiva di spiaggia emersa può risultare sostanzialmente differente da quella fornita dalla 1.2 e la migliore approssimazione, basata sul concetto di profilo di equilibrio, risulta:

$$h(y) = Ay^{2/3} \quad (1.3)$$

dove $h(y)$ é la profondità legata alla distanza (y) verso il largo, mentre il parametro di scala A é funzione della dimensione del materiale o, in modo equivalente, della velocità di sedimentazione.

1.5.2 Larghezza della spiaggia ottenibile con ripascimento

Dalla figura 1.4 si nota come il parametro di scala A dell'eq. 1.3, diminuisca con il diminuire della dimensione del sedimento; ne consegue che un sedimento più fino sarà associato ad un profilo di pendenza più dolce rispetto a quello di un sedimento grossolano.

L'effetto della scelta della dimensione del sedimento sulla modificazione della larghezza della spiaggia é che più grossolano é il materiale di ripascimento, più grande sarà la larghezza della spiaggia emersa per unità di volume versato.

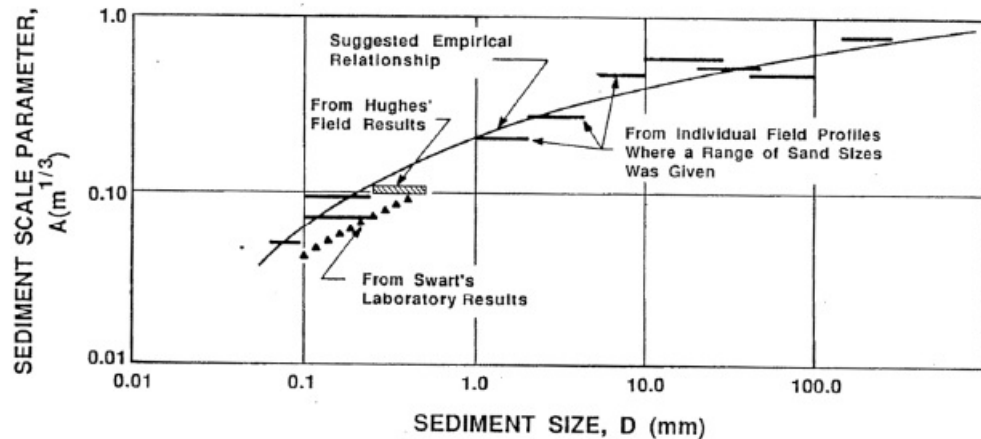


Figura 1.4: Variazione del parametro di scala A con la dimensione del sedimento e la velocità di sedimentazione (Dean, 1987)

1.6 Valutazione del fabbisogno effettivo di sabbia

L'esigenza di valutare il quantitativo di sabbia per contrastare l'erosione delle coste deriva dalla necessità di pianificazione, legata ad aspetti quantitativi e qualitativi del problema.

La quantità e la qualità di sabbia necessaria, influenza l'impostazione della ricerca dei giacimenti (dimensioni, caratteristiche, localizzazione) e di conseguenza la programmazione ed il dimensionamento degli interventi.

Si possono distinguere diversi livelli del fabbisogno:

- **totale per la manutenzione** ($m^3/anno$): è la quantità di sabbia o inerte necessaria a compensare l'erosione in tutti quei tratti di litorale che risultano in arretramento;
- **totale per la ricostruzione** (m^3): è la quantità di sabbia o di inerte in genere necessaria alla ricostruzione dei litorali esposti storicamente all'erosione fino al raggiungimento di determinate ampiezze preesistenti.

Sono queste quantità teoriche le quali, pur corrispondendo alle reali condizioni di perdita, non corrispondono alle effettive quantità necessarie agli interventi di manutenzione e ricostruzione. Infatti il deficit di sabbia deriva da disequilibri (naturali od antropici) che si sono manifestati nel ciclo sedimentario. Per quanto difficile, è opportuno valutare la possibilità di intervenire sulle cause di questo squilibrio, cercando di generare nuovamente le condizioni di trasporto e sedimentazione originarie.

Alcuni elementi di squilibrio possono essere rimossi o attenuati, in particolare:

- può essere impedita, o almeno regolamentata, l'estrazione di inerti dai fiumi o dai litorali;
- il materiale sabbioso che si accumula sopraflutto ad opere in aggetto sulla costa come imboccature portuali, moli, pennelli, può essere portato oltre l'opera con by-pass;
- il rilascio dei sedimenti dalle opere di sbarramento può essere riattivato.

Il calcolo del fabbisogno richiede un monitoraggio a grande scala e lo studio della situazione locale del ciclo sedimentario.

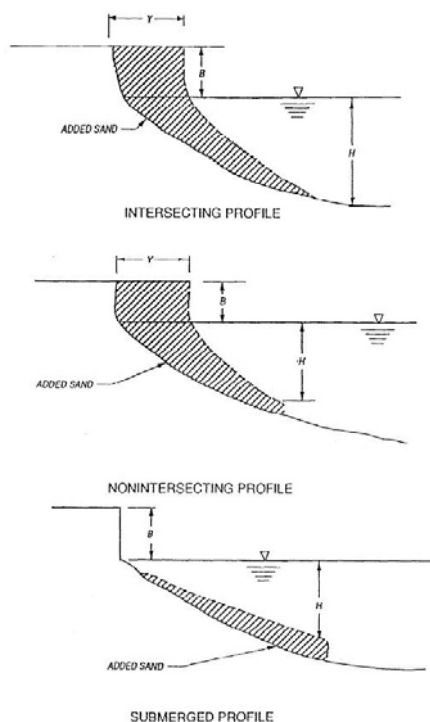


Figura 1.5: Tre generici tipi di profili di ripascimento

1.7 Disponibilità del materiale

Il volume totale di materiale necessario a ripascere un profilo di sabbia può essere considerevole. Qualora esso diventi rilevante, ci sono poche possibilità che un'estrazione da una cava terrestre ed il relativo trasporto risultino economici: le tecniche del dragaggio saranno generalmente meno costose e procureranno meno perturbazioni. Solitamente si cerca un materiale dalle caratteristiche simili a quello originario presente sulla spiaggia; si preferisce a volte utilizzare un materiale che abbia un diametro maggiore in quanto sarà migliore la resistenza all'erosione e quindi maggiore la vita utile dell'intervento, (Tomasicchio 2011).

Le categorie riguardo le fonti di prestito per la ricarica di una spiaggia sono sostanzialmente quattro: terrestre, zone basse, al largo e canali.

- *Risorse terrestri*; queste fonti si trovano spesso nelle zone costiere in quanto i vecchi terrazzamenti fluviali e marini ed i filoni in tracce, come alcuni elementi glaciali o le pianure alluvionali, contengono spesso materiali utilizzabili. Il costo per unità di materiale risulta quasi sempre molto superiore a quello delle località sommerse. In confronto al refluento idraulico, quello meccanico comporta limiti pratici a livello di volumi, ed il suo refluento si limita generalmente alla sola spiaggia emersa: questo dà luogo ad un bilanciamento ed un arretramento più rapidi del materiale versato.
- *Zone basse*; i depositi di sedimenti si trovano nelle paludi, nelle baie, negli estuari e lagune situati dietro i litorali. È questa una fonte di ricarica interessante perché queste zone sono protette dalle onde e sono sufficientemente vicine alla spiaggia in deficit, quindi il materiale viene trasferito via condotta. Per contro, i sedimenti che si trovano in queste zone sono caratterizzati da una granulometria fine e le zone basse sono inserite in un ecosistema marino

molto delicato e risultano quindi sensibili alle perturbazioni e modifiche dovute al dragaggio.

- *Porti canali e vie navigabili*; la costruzione di porti, canali e vie navigabili si accompagna spesso a lavori di escavo e recupero di importanti volumi di sedimenti. In alcuni casi, quando la qualità del sedimento lo permette, esso può fungere da ricarica per le spiagge.

Le operazioni legate a questa procedura sono dal punto di vista economico interessanti poiché hanno un doppio vantaggio:

- il dragaggio di manutenzione del sedimento nelle località di navigazione situate in ambienti ad energia debole come gli estuari o le baie protette, è meno atto a produrre un materiale di ricarica adeguato in quanto è argillaceo, fangoso e a sabbia molto fine. Tuttavia, quando si tratta del dragaggio di nuovi porti, esso può permettere di scoprire materiale non deteriorato e dalle caratteristiche adeguate.
 - il materiale dragato nelle zone a più alta energia come fiumi o estuari, spesso risulta più idoneo ai fini della ricarica in quanto è simile al materiale d'origine della spiaggia. Occorre comunque verificarne la compatibilità fisica, chimica e microbiologica.
- *Risorse situate al largo*; le quantità a disposizione in questo caso sono notevoli, occorre però valutare gli effetti potenziali che derivano dall'eliminazione del materiale alla sua fonte: può risultare dannoso estrarre materiale vicino al litorale poiché questo potrebbe accelerare l'erosione della riva adiacente. Sebbene quasi tutti i tipi di draghe possano essere utilizzati, quelle che convengono per trasporto e refluimento sono sia la draga aspirante semovente sia quella stazionaria aspirante con disgregatore. I cantieri si limitano a profondità di 30-50 metri anche se alcune draghe possono raggiungere 80-100 metri ed oltre.

1.8 Monitoraggio

Il monitoraggio dell'evoluzione delle spiagge riveste un ruolo fondamentale in ogni politica territoriale in cui sia coinvolta la fascia litorale in quanto qui si concentrano i 2/3 della popolazione mondiale supportando inoltre una florida attività turistica. Dato che la spiaggia costituisce l'elemento di maggiore valore economico del sistema costiero, ma anche quello più fragile e più soggetto a variazioni morfologiche, lo studio dell'evoluzione dei litorali è fondamentale per la pianificazione di questa zona. I principali obiettivi sono:

- studio dell'evoluzione costiera a medio/lungo termine per l'impostazione di piani di sviluppo e di gestione;
- analisi del bilancio sedimentario del litorale per lo studio dei rapporti fra input fluviale e dispersione *cross-shore* e *long-shore* dei materiali;
- studio dell'evoluzione costiera a breve termine per la valutazione dell'impatto delle opere marittime;
- studio dell'evoluzione costiera a breve termine per la valutazione degli interventi di difesa;
- determinazione dei canoni demaniali.

L'impostazione di un sistema di monitoraggio é quindi un aspetto importante nella gestione della fascia costiera e l'efficacia dello stesso deriva dalla scelta della scala d'indagine, delle procedure di misura e della tempistica associata, tutti parametri che dipendono dagli obiettivi che si intendono raggiungere e dalle risorse finanziarie disponibili.

1.9 Caratteristiche sedimentologiche

Informazioni riguardo le caratteristiche granulometriche del materiale che copre naturalmente la spiaggia possono dare spiegazione dei processi idrodinamici esistenti. Le variazioni sistematiche del diametro medio lungo la spiaggia o la presenza di elementi traccianti naturali nella sabbia, possono dare indicazioni sulla direzione del trasporto longitudinale netto.

Per la ricarica, come già detto, si preferirá una sabbia con granulometria simile a quella originaria, per massimizzare la compatibilitá con il sistema esistente. Questo consente inoltre di massimizzare le previsioni riguardo l'efficacia futura dell'intervento.

La compatibilitá del sedimento deve riguardare anche le caratteristiche chimiche e microbiologiche dello stesso, dato che si tratta di attivitá che presentano rilevanti effetti ambientali e che possono rappresentare un'attivitá di rischio anche per la presenza, talvolta, di contaminanti.

In relazione a ciò, la normativa nazionale prevede che venga verificata la compatibilitá chimica, fisica e microbiologica del materiale tra l'area di dragaggio e l'area di ripascimento, (Cossettini e Iacovone 2005).

Capitolo 2

Storia del dragaggio

I cambiamenti nell'ingegneria marittima e nella gestione delle acque sono avvenuti in molti modi nel corso della storia. Ma alla fine di questo millennio, non è stato solo il cambiamento ad essere notevole: è il tasso di accelerazione del cambiamento ad essere il fattore determinante. Le opere idrauliche hanno modificato il nostro mondo e le condizioni della nostra vita nel corso degli ultimi secoli: l'uomo ha aumentato il suo controllo sulla natura, anche nel più remoto angolo del pianeta.

Scienza, tecnologia e organizzazione hanno trasformato la minaccia dell'acqua in una grande sfida e una opportunità commerciale. Altre tendenze possono essere meno visibili, ma sono altrettanto importanti, come il miglioramento delle condizioni di lavoro, la globalizzazione dell'industria, la professionalizzazione e l'integrazione delle imprese di dragaggio.

Progetti di porti, sistemazione dei corsi d'acqua, bonifiche e attività in mare aperto, su scala che le generazioni precedenti potevano solo sognare, sono diventati una pratica comune al termine di questo millennio. In diversi paesi, piccole imprese di famiglia sono cresciute con forza, capitalizzandosi provatamente in società, spodestando più tardi il dragaggio, ancora nelle mani dello stato. Sono state stabilite modalità innovative di collaborazione e di gestione come pubblico-privato e contratti di concessione del tipo *Build-Operate-Transfer* (BOT). L'educazione formale dell'equipaggio e della manodopera qualificata ha sostituito la formazione *on-the-job* e l'esperienza ereditata. Il controllo della qualità e della gestione della sicurezza è diventato parte intrinseca di qualsiasi progetto di ingegneria. La cura per l'ambiente ha aggiunto una dimensione completamente nuova e ha anche portato alla diversificazione dell'attività principale. L'elettronica, l'imaging e la fusione tra computer e comunicazione ha trasformato l'attività di dragaggio in un settore high-tech.

Alla vigilia del nuovo millennio, enormi jumbo trailer e potenti draghe ad aspirazione sono entrati in servizio. Grandi progetti sono in corso di esecuzione, con lo scopo di trasformare il mare in terre abitabili nonché di estendere la profondità delle acque navigabili nell'entroterra. Il campo di applicazione dell'industria di dragaggio ha ampliato le attività offshore e i programmi di risanamento ambientale.

2.1 Gli inizi

La civiltà è nata sulle rive dei grandi fiumi, dal momento che l'acqua è il presupposto della vita, l'umanità si è stabilita lungo il Nilo, l'Eufrate, il Tigri, l'Indo e il lo Yangtze-Kiang. Sin dai tempi antichi l'uomo ha cercato modi di trattare l'acqua - il bene principale per abbeverarsi, per i principali servizi

igienico-sanitari, per l'irrigazione e la coltivazione, ed infine per il trasporto e la comunicazione. Ai nostri giorni, in cui la metà dei sei miliardi di persone del pianeta vive nelle città, circa l'80 per cento della popolazione mondiale abita a meno di 50 chilometri da fonti di acqua. L'uomo quindi ha sempre interferito con l'ambiente per creare un mondo migliore e un luogo sicuro in cui vivere e lavorare. Dighe, canali e argini sono stati costruiti per proteggere i primi insediamenti o per fornire acqua per l'irrigazione. L'agricoltura a terrazza era presente nei campi arati in Asia, Europa, Africa e nell'area andina, mentre Fenici, Assiri, Sumeri, Egiziani e Babilonesi sono noti per aver costruito sistemi di canali impressionanti, le cui tracce possono ancora essere trovate. Secondo lo storico greco Erodoto, un faraone egiziano della ventiseiesima dinastia, Neco II, che regnò tra il 610 e il 595 a.C., iniziò la costruzione di un canale tra il Nilo ed il Mar Rosso, attraverso il quale le merci provenienti dall'Arabia, entravano nel delta. I lavori sono stati sospesi per volere di un oracolo, ma sono stati successivamente ripresi dal re persiano Dario nel 5° secolo a.C.; quando Ferdinand de Lesseps iniziò gli scavi attraverso l'istmo di Suez più di due millenni dopo, erano ancora visibili le tracce del vecchio canale di Neco II.

Per secoli, la mancanza di attrezzatura adeguata è stata un ostacolo per i grandi lavori pubblici da eseguire *sul bagnato*. Eppure, ci sono prove che i Fenici costruirono porti artificiali a Sidone e Tiro nel 13° secolo a.C.

Tra gli esempi che sono sopravvissuti si possono citare il porto interno di Mozia realizzato dai Fenici, al largo della punta occidentale della Sicilia e l'antico porto di Gadir costruito nel 9° secolo a.C., che è l'attuale città di Cadice in Spagna. Altri porti famosi del mondo antico furono quelli del Pireo, Siracusa, Cartagine e Alessandria, con il primo faro.

Come questi antichi porti artificiali sono stati mantenuti alla necessaria profondità per molti anni è in gran parte sconosciuto, ma di fatto, gli stessi processi di interrimento avvengono anche oggi: essi fecero già la loro azione dannosa in quell'epoca.

Alcuni storici sostengono, riferendosi ad antichi geroglifici, che la draga manuale era già conosciuta e utilizzata ai tempi dell'Egitto faraonico: l'efficienza di questa primitiva tecnica di dragaggio deve essere stata piuttosto scarsa. Le correnti ed il trasporto litoraneo, l'avanzamento della linea di riva e l'azione erosiva della corrente dei fiumi, hanno causato la scomparsa dei porti antichi a causa del massiccio insabbiamento.



Figura 2.1: Draga manuale

Per quanto riguarda la civiltà Romana, anche se nessuna prova materiale è sopravvissuta, è noto che gli ingegneri avevano macchinari e gru a loro disposizione per il sollevamento: costruirono un ponte sul fiume Tago ad Alcantara, Spagna,

nel 110 d.C.; l'apparecchiatura è citata da Giulio Cesare nella sua *De bello Gallico*, quando parla della costruzione di un ponte sul Reno. Le legioni romane canalizzarono anche una delle foci del fiume Rodano. Nel primo secolo d.C. il console romano Marco Livio Druso ordinò lo scavo di un canale tra il Reno e Yssel per scolmare l'acqua in eccesso dal Reno, e il generale romano Corbulone è noto per aver collegato il Reno e la Mosa con 37 chilometri di canale.

Allo stesso tempo, i cinesi stavano costruendo canali impressionanti, come ad esempio i 144 chilometri di Ling Ch'u in Kuangsi. Come risulta dai documenti cinesi di 2000 anni fa, i due grandi fiumi della Cina, il Fiume Giallo e lo Yangtze, hanno sempre causato problemi di inondazioni. E i cinesi accuratamente documentarono come costruire e riparare dighe nonché come dirigere i fiumi in bacini di ritenzione.

2.2 I secoli Europei

È un fatto storico che grandi scoperte tecnologiche dello scorso millennio, sono venute dall'Europa: la storia del Vecchio Continente può essere scritta sulla base dei punti salienti nella capacità di controllare l'acqua. La meccanica navale è un patrimonio unicamente europeo, con contributi dall'Italia, Inghilterra, Paesi Bassi, Belgio, Francia, Spagna, Germania e Svezia. Lo sviluppo di questa tecnologia è stato un processo complicato ma quando tutte le moderne tecnologie di base si sono rese disponibili all'inizio di questo secolo, le società di dragaggio europee, che si sono rapidamente sviluppate in unioni pienamente organizzate, hanno assunto un ruolo di primo piano nel mercato globale.

Per secoli dopo la caduta dell'Impero Romano, l'Europa scivolò di nuovo in un mondo eterogeneo di comunità locali e la gente doveva combattere le forze della natura con le proprie mani. L'ingegneria idraulica non esisteva come tale, la protezione contro le inondazioni non era una professione ma un dovere e una parte di vita quotidiana per tutti gli agricoltori.

La colonizzazione delle terre incolte e delle paludi era l'impostazione per i primi progetti di bonifica nel nord-ovest dell'Europa. Entro la fine del primo millennio, il potere unificante della Chiesa cristiana, assieme ai proprietari terrieri Franchi, fu in grado di mobilitare la popolazione analfabeta per realizzare opere ingegneristiche che superavano le possibilità dei singoli agricoltori. La rinascita del latifondo, della nobiltà terriera, fornì, alla fine del primo millennio, le competenze organizzative per le grandi opere pubbliche. Ogni abitante sotto l'autorità della chiesa o di un feudatario doveva dare il suo contributo come parte dei doveri feudali.

2.3 L'inizio della bonifica

Nel corso del tempo, le paludi bonificate sarebbero diventate un terreno ricco per la coltivazione e l'allevamento: è interessante notare come parte di quel terreno bonificato, ancora visibile su vecchie mappe, è completamente scomparso dopo alcune gravi inondazioni. La bonifica è una parte integrante del patrimonio e della tradizione europea. Uno dei primi lavori di bonifica è stato nel 1103, quando Federico, vescovo di Brema, bonificò e coltivò il Wilster Marsh, una vasta area ad est del fiume Elba. Di pari passo con l'autorità dei conti, gli ordini monastici sono stati l'unica forza in grado di reclutare e di mobilitare intere popolazioni. Entro la fine del XII secolo, l'approccio difensivo tramite la realizzazione di dighe a protezione dalle inondazioni ha lasciato posto a progetti di bonifica. All'incirca nello stesso tempo iniziarono i lavori di estrazione della torba, principale combustibile

dell'epoca, *sul bagnato*. La draga manuale è stata utilizzata per molto tempo, ma è stato a partire dalla prima metà di questo millennio, e in effetti solo fino a pochi secoli fa, che è diventato l'unico strumento per quello che può considerato un dragaggio primitivo. All'estremo di un palo lungo circa tre metri, veniva fissato ad un anello di ferro una rete o un secchio: l'anello serviva per raschiare sul fondo e sollevare il materiale, svuotando poi il secchio in una chiatta o direttamente a terra. A seconda della profondità e della consistenza del materiale, erano necessari uno o due uomini. Più tardi, iniziarono a comparire attrezzature meccaniche per sollevare il palo. Anche se l'agricoltura era l'attività economica predominante in questo periodo medievale, il commercio cominciò ad emergere; nei Paesi Bassi, per la loro posizione vicina al mare e per la presenza dei grandi fiumi europei, aumentò l'importanza del traffico e del commercio sui corsi d'acqua, anche perché questo era l'unico modo possibile per un trasporto di grandi quantitativi di merce.

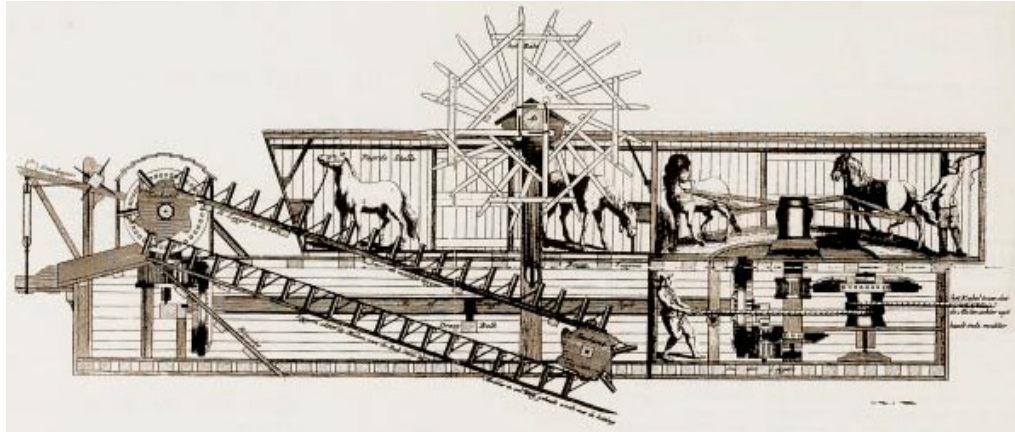
2.4 Il porto interno di Brugges

Nei primi secoli del primo millennio, la città fiamminga di Bruges è emersa come il principale centro di commercio dell'Europa a nord delle alpi, essa divenne nota come la Venezia del Nord, anche a causa dei suoi canali passanti per il centro urbano. Originariamente, Brugge è stata collegata alla foce dello Zwin, nella quale il REIE, un canale scavato nel XI secolo, sfociava. I lavori di dragaggio in questo canale vengono raccontati fin dal 1292. Al culmine della sua fama nel XIV secolo, la città ha attratto mercanti e merci dalla Scandinavia e dal Baltico a sud dell'Europa. Tuttavia, anche in quel momento la città non poteva più essere raggiunta in alto mare da navi marittime, anche se con stazza minore di 100 tonnellate. Le merci europee sono state convogliate allora in porti, come Damme, che erano ancora collegati al mare. Da allora, il XIV secolo ha rappresentato il primo di tre cosiddetti periodi d'oro nei Paesi Bassi. In tutti e tre i casi, l'insabbiamento, la chiusura della bocca di accesso, o importanti riduzioni della profondità, sono stati minacce permanenti per una sostenuta espansione, sia essi siano stati causati dalla natura sia che l'uomo ne sia stato il responsabile. Questo ha rappresentato un grande problema, affrontato da altri porti di tutta Europa. La società medievale non aveva la tecnologia per mantenere libero accesso al mare. L'aumento poi delle dimensioni delle navi ha intensificato solo la sfida. Nei secoli che seguirono, molti progetti significativi sono stati eseguiti in tutta Europa. Re Giacomo I chiese all'olandese Cornelius Vermuyden di drenare grandi distese di paludi a Windsor, York e Lincoln. Lo zar Pietro il Grande ha cercato di sfruttare le competenze sul dragaggio che aveva visto in Olanda per utilizzarlo nella fondazione di San Pietroburgo nel 1703. Eppure, centinaia di anni dopo gli inutili tentativi di Brugge erano ancora come inermi e impotenti per trovare soluzioni durature: l'insabbiamento era un problema europeo, per il Vecchio Continente, il mare era una finestra sul mondo, ma anche una minaccia e una frustrazione.

2.5 Sistemi di dragaggio

2.5.1 Forza lavoro

Dal medioevo ai giorni della rivoluzione industriale, la gente è stata occupata con soluzioni di sviluppo per il dragaggio e per l'ingegneria marittima. L'antica draga manuale rimase immutata e fu mantenuta in uso, ma la sua capacità era troppo limitata in termini di profondità, volume e tempo. L'evoluzione della

Figura 2.2: Mulino a fango *Amsterdam*

navigazione interna e la crescente dimensione dei canali di navigazione necessitavano dello sviluppo di una nuova apparecchiatura di dragaggio. E una notevole varietà di macchine di dragaggio venne progettata. La sfida maggiore era naturalmente quella di trovare l'energia sufficiente: nessuna soluzione soddisfacente sarebbe stata trovata prima dello sviluppo di nuovi materiali e l'avvento del vapore. Per molti secoli, il lavoro manuale e gli animali sono stati la principale fornitura di energia. Vanghe, carriere, chiatte, carrucole e argani, gru, paranchi, anche il vento e la corrente sono state utili, ma alla fine è stata la forza dell'uomo e degli animali, che è stata guida anche per le attrezzature più ingegnose.

Dalla metà del XV° secolo, un dispositivo entrò per allentare il terreno, anche se non era di utilità alcuna per la rimozione che era lasciata alle correnti di marea. Ruspe di ferro erano fissate sotto la chiglia di un'imbarcazione, consentendo il trascinarsi sul fondo. Una variante è stata la draga-erpice, che poteva essere gestita da uomini o cavalli.

Si dice che i Turchi costringevano i velieri a trascinare una sorta di erpice dietro di loro nel momento in cui erano in rotta con la foce del Danubio.

Quando nel 1670 l'ingegnere olandese Cornelio Meyer Olandese venne richiesto dal Papa per realizzare delle opere idrauliche nel fiume Tevere, utilizzò erpici tirate da cavalli per approfondire il fiume.

La rimozione del materiale allentato era di sicuro un'altra storia. Da tempi molto antichi era conosciuta la catena senza fine, a volte chiamata scala Jacobs o paternoster, uno strumento che sarebbe poi stato applicato nelle successive draghe a secchio.

2.5.2 Il mulino a fango

Per più di tre secoli, il mulino a fango divenne la macchina di dragaggio più utilizzata nelle opere di manutenzione in Europa. La nuova tecnologia ha coinciso con la Golden Age of Holland, segnata da rapidi mutamenti economici come la crescita, l'espansione all'estero e la prosperità. In sostanza, il mulino a fango era una catena senza fine che veniva azionata da una ruota, girata dal movimento di alcuni uomini; esso era efficiente nel fango morbido ma non nella sabbia; era un lavoro estremamente duro, fatto da prigionieri, per i quali *la ruota* era una punizione severa. All'inizio del XVII secolo, il sistema è stato migliorato con l'introduzione dei cavalli. Il mulino a fango di Amsterdam ha dimostrato di essere uno strumento valido e numerose varianti si trovano in diversi paesi europei. Dopo

l'introduzione della forza lavoro animale, i mulini a fango divennero ancora più grandi ed erano in grado di dragare profondità maggiori.

2.5.3 Altre macchine

Intorno al 1592, operò una draga a benna da riva guidata da manodopera e argani, nota come la *macchina di dragaggio veneziano*, inventata dall'italiano Pietro Venturino. Questo dispositivo era conosciuto in diversi paesi: tracce del suo utilizzo possono essere infatti trovate ad Anversa, Kampen, Amburgo e Brema. Nel XVIII secolo, molti ingegneri francesi come Belidor, Guyot e Macary svilupparono le cosiddette draghe a cucchiaio, applicate poi in tutta Europa. Alla fine del XVIII secolo, la tecnologia nel dragaggio ed i relativi miglioramenti avevano chiaramente raggiunto i loro limiti. Da questo momento incisivi furono traguardi come l'energia e la potenza. La tecnologia originale è stata sviluppata nell'Europa continentale, soprattutto nei prosperi paesi bassi; l'innovazione sarebbe venuta invece dall'altra sponda del Mar del Nord, dove la rivoluzione industriale era in corso.

2.5.4 Macchine a vapore e motori diesel

Anche se il XX secolo ha visto molti miglioramenti, tutte le invenzioni di base del settore del dragaggio si sono verificate tra il 1800 e il 1900. Entro il 1900, tutta la tecnologia fondamentale che viene utilizzata ancora oggi era già disponibile. Il XIX secolo è stato un periodo che ha cambiato il mondo più di tutti gli altri secoli presi nel loro insieme. La rivoluzione industriale non è stato un singolo evento, né è accaduto in un momento o in un unico posto, ha avuto inizio nel tardo XVIII secolo in Inghilterra, e presto si sarebbe diffuso nell'Europa continentale e negli Stati Uniti.

Nel campo del dragaggio e dell'ingegneria navale, si ebbe una transizione dalla manodopera al vapore, e più tardi dal legno all'acciaio: ora il dragaggio, l'approfondimento, la bonifica e progetti marittimi diventati fattibili, come la costruzione dei canali di Suez e Panama, il piano Delta che chiude i Paesi Bassi dal mare, l'estensione di porti e le isole artificiali nel Sud-Est asiatico. Il processo di innovazione è stato lento, lungo più di 120 anni, ci sono voluti molti decenni anche per migliorare e perfezionare la nuova tecnologia: alcune delle prime draghe a vapore erano chiaramente insuccessi tecnici.

La progettazione e la capacità delle draghe a benna funzionanti a vapore erano ancora in via di miglioramento, e l'invenzione della pompa centrifuga migliorò decisamente la situazione. Queste invenzioni cambiarono anche radicalmente il modo abituale dello stile di vita e le condizioni sociali: il dragaggio e l'ingegneria marittima erano sempre stati un lavoro estremamente duro e faticoso, ma ormai i giorni della draga a mano erano chiaramente finiti. Con una draga manuale, un lavoratore poteva dragare un massimo di 2 metri cubi all'ora, a seconda delle condizioni del terreno e della profondità. Nel 1870, un imprenditore olandese era orgoglioso di segnalare che una sua draga ad aspirazione raggiungeva una media giornaliera di 580 metri cubi di sabbia e poteva lavorare per 165 ore consecutive. Meno di 30 anni dopo, l'ingegnere americano Lindon Bates è stato il vincitore di un concorso per costruire una draga ad aspirazione, con una capacità di 1 600 metri cubi all'ora. Durante le 175 ore di prove ufficiali, questa draga ha realizzato una produzione media di 5 945 metri cubi, con un record di 7 789 metri cubi all'ora. Il governo belga, inviato a studiare le tecniche di dragaggio utilizzate sul fiume Mississippi, concluse che questa draga era molto superiore a tutte quelle conosciute nel Vecchio Mondo. Bates fu invitato al 7° Congresso Internazionale di

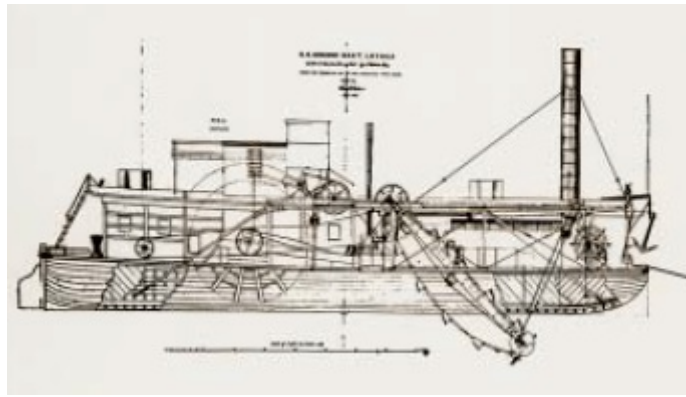


Figura 2.3: Schema della *Lavaca*, draga semovente a vapore costruita a Louisville, Kentucky, nel 1847

Navigazione (AIPCN) a Bruxelles, dove è stato accolto tra gli applausi entusiasti di un pubblico specializzato; era 1898 ed il XX secolo doveva ancora cominciare. Secondo la ricerca storica di Skempton, la prima draga a vapore era una draga cucchiaio, che operava nel porto inglese di Sunderland nel 1798, con un motore a vapore da 4 HP Boulton & Watt, installato su una nave esistente.

Gli americani, tuttavia, riferendosi alla strana *Orukter Macchina Amphibolos*, affermano di essere stati i primi a costruire una draga a vapore. Probabilmente la prima draga a vapore veramente di successo è stata messa in funzione a Portsmouth, in Inghilterra nel 1802.

La tecnologia si è rapidamente diffusa: in Europa, le innovazioni hanno trovato applicazione in Belgio, per la presenza di carbone e di altre materie prime, per una tradizione secolare di forgiatura del ferro, e per la disponibilità di una forza lavoro qualificata.

2.5.5 Le draghe idrauliche

Contemporaneamente, accanto allo sviluppo e al miglioramento della draga meccanica a secchie, la nuova tecnologia idraulica di dragaggio si stava sviluppando. È interessante notare che la concorrenza tra draghe a secchie e draghe ad aspirazione è continuata anche in questo secolo, fino a quando le prime non scomparirono nell'ultimo decennio del XX secolo. Alla fine, sia le draghe a tramoggia che quelle aspiranti sono cresciute in dimensione raggiungendo la grandezza dell'attuale draga jumbo. Miglioramenti e perfezionamenti della tecnologia, l'aumento produttività e del fattore di scala, l'emergenza di motori diesel, e, infine, la fusione delle aziende semba quindi all'ordine del giorno del XX secolo.

2.6 Il XX secolo

Due eventi separati hanno accelerato questi processi di cambiamento: il primo è stato la pesante perdita di impianti e macchinari nelle guerre mondiali e durante la Rivoluzione bolscevica in Russia, che ha portato al rinnovamento importante nell'industria; il secondo è stata l'espansione delle compagnie europee di dragaggio sui mercati esteri, dopo importanti lavori pubblici, che hanno guidato il business del dragaggio in un livello superiore.

Affacciata su un arco di tempo di un secolo e mezzo, dal 1820 fino al 1970, l'espansione fenomenale dei porti europei lungo la linea Amburgo-Le Havre simboleggia il risultato duraturo di ciò che l'ingegneria marittima ed il dragaggio

possono realizzare. Dunkirk/Gravelines e Le Havre sono diventati i maggiori centri commerciali lungo il Canale della Manica, contemporaneamente Marsiglia e FOS sono stati approfonditi per diventare la finestra francese sul Mediterraneo ed il Medio Oriente. Zeebrugge è stata costruita dietro un impressionante frangiflutti da 4.4 km, con un avamporto, un porto interno e un porto interno a Brugge.



Figura 2.4: Porto di Amburgo

Considerando che, a metà del XIX secolo, Rotterdam aveva una rilevanza solo regionale, nel corso di questi ultimi 100 anni si è sviluppata diventando il porto numero uno al mondo, con la gestione di un volume record di 315 milioni di tonnellate alla fine di questo millennio.

Il porto di Amsterdam, che era svanito tra il 1839 e il 1859, ha trovato un rinnovato dinamismo dopo aver ottenuto un migliore collegamento con il mare aperto attraverso il Canale del Mare del Nord nel 1867. La dimensione di queste opere potrebbe solo essere messa in ombra dall'ancora più ambizioso piano Delta eseguito a partire dal 1960 attraverso il 1980, che ha protetto la costa principale, mantenendo il flusso di marea con una serie di dighe. Il continuo approfondimento di canali di navigazione e una straordinaria espansione del territorio portuale, ha trasformato i porti della Germania settentrionale di Wilhemshaven, Brema, Bremerhaven e Amburgo in punti di distribuzione strategica in una delle nazioni più ricche del pianeta.

Più recentemente il dragaggio di manutenzione sul Continente latino americano è aumentato notevolmente. Sostenuto dal governo argentino, il porto di Buenos Aires e i principali corsi d'acqua del Rio de la Plata e il fiume Parana hanno tutti subito importanti attività di dragaggio. Anche il porto di New York/New Jersey, che a causa della mancanza di manutenzione, è scivolato dall'essere il principale porto al mondo della fase seguente alla Seconda guerra mondiale, a perdere quel suo ruolo originale ma ha ripreso ultimamente i lavori di dragaggio.

Dragaggio di manutenzione quindi, ovviamente della massima importanza economica, notevolmente migliorato non solo in termini di produttività, ma anche per quel che riguarda l'efficienza e la precisione.

La ricostituzione delle spiagge e delle coste ha guadagnato anch'essa importanza negli ultimi 50 anni, non solo per la protezione costiera, ma anche per usi ricreativi: le spiagge di Spagna e Italia, la costa meridionale dell'Inghilterra, il litorale del Maine a Miami, e la parte meridionale della cosiddetta Gold Coast dell'Australia sarebbero scomparse da tempo senza il costante approvvigionamento di sabbia da parte delle imprese di dragaggio.

Nel corso di una generazione, l'industria del dragaggio è cambiata più profondamente che mai. In termini di impianti, di automazione, di progetti e di aziende:



Figura 2.5: Aeroporto internazionale di Kansai, Giappone

quasi nulla oggi può essere paragonato all'ambiente di soli 30 anni fa. Se la velocità di cambiamento continua allo stesso ritmo, si può prevedere che navi di dragaggio ancora più grandi e dotate di apparecchiature più sofisticate, potranno effettuare progetti di bonifica e di ingegneria marittima ancora più complessi. L'aumento del fattore di scala è schiacciante alla fine del XX secolo: nel 1870, una draga ad aspirazione (a vapore) aveva una capacità di 139 metri cubi a bidone, nel 1993, la capacità era di 11 000 metri cubi, nel 2000, essa risultava di 33 000 metri cubi.

La profondità alla quale viene eseguito il dragaggio è aumentata si possono ora raggiungere più di 100 metri, come è stato recentemente dimostrato in progetti offshore a Taiwan e al largo della costa di Terranova, in Canada.

2.7 Dragaggi ambientali

La panoramica degli ultimi 30 anni non è completa senza citare i grandi progressi raggiunti nel dragaggio ambientale. Il valore dell'acqua e la protezione della vita marina sono diventati guida in quasi tutti i progetti di dragaggio moderno. Senza dubbio, trattati internazionali, come la Convenzione di Londra del 1972 e il OSPARCON, hanno fissato nuovi standard per la manutenzione di oceani, fiumi e mari. Limitazione e controllo della torbidità quando si effettua un dragaggio ed il ripristino degli habitat naturali quali le zone umide sono parte di diverse tecniche di dragaggio ambientale: occorre prevenire la diffusione della contaminazione del materiale dragato e trovare soluzioni per lo smaltimento dello stesso, se inquinato.

La precisione nel dragaggio è aumentata enormemente negli ultimi 40 anni, di conseguenza c'è meno overdredging e, per la particolare attrezzatura, è possibile lavorare con la tolleranza del centimetro. Il telerilevamento infatti consente una maggiore accuratezza nel dragaggio: i satelliti lanciati in orbita forniscono dati importanti sulla radiazione elettromagnetica riflessa dal pianeta; vengono utilizzati sia Landsat TM che Immagini XS SPOT.

Ecoscandagli multibeam possono essere installati a prua o sulla base di draghe rimorchio ed i software possono così rendere visibile il fondale in una visualizzazione tridimensionale durante il trascinamento o le operazioni di scarico, (Vanderostyne e Cohen 1999).

2.8 Il XXI secolo

La tecnologia di dragaggio è cambiata notevolmente, la ricerca di base è svolta nelle università e negli istituti tecnici, sono stati sviluppati pacchetti software, la tecnica e la progettazione sono state migliorate, il dragaggio profondo è diventato possibile, nonostante le evidenti restrizioni nel lavorare in acque alte.

Mentre l'economia mondiale ha intrapreso una configurazione globale, le società di dragaggio si sono fuse in gruppi potenti e questi sono diventati gli attori globali in competizione per gli appalti più importanti. Inoltre, nuovi giocatori sono entrati nel mercato internazionale, quali le società provenienti da Giappone, Corea e Cina. Le aziende statali sono state privatizzate, così, nuovi schemi di partnership pubblico-privato iniziano a comparire. I contratti più importanti sono ora a carico di società o gruppi di imprenditori, in quanto gli investimenti, i rischi e l'esecuzione dei grandi progetti odierni sono oltre i livelli che possono essere a carico di una singola azienda.

Sin dalle prime civiltà, i governi hanno cercato il modo di gestire l'acqua: essa ha sempre costituito una minaccia, ma al tempo stesso una grande opportunità per la comunicazione, il trasporto ed il commercio.

All'inizio di un nuovo millennio, il problema della sovrappopolazione, la crescita del settore, e la necessità di tutelare l'ambiente, richiedono quindi uno standard elevato nel settore dell'ingegneria idraulica e marittima, nonché nella protezione dell'ambiente.

Capitolo 3

Il dragaggio

3.1 Tipi di dragaggio

Il dragaggio é un termine generale che riassume una grande varietà di differenti attività; gli obiettivi principali sono essenzialmente quattro:

1. economici, legati alla realizzazione dei fondali necessari al transito delle navi nei canali di accesso ai porti e nei bacini portuali;
2. ricreativi, eseguendo lavori di ripascimento delle spiagge salvaguardandole dal mare;
3. difesa, intesa come prevenzione dalle inondazioni tramite la realizzazione di dighe;
4. ambientali, con la rimozione del material inquinato.

Anche se meno comunemente, il dragaggio é usato per reperire minerali e metalli preziosi o per rimuovere la parte sovrabbondante che li ricopre. Possono quindi essere riconosciuti tre principali categorie: lavori principali, di mantenimento e correttivi.

Dragaggi infrastrutturali - *Capital dredgings*

Essi riguardano la creazione di nuovi o il miglioramento di servizi come i bacini portuali, una più profonda navigazione nei canali, un lago o un'area di bonifica per scopi industriali o residenziali. Questi progetti sono generalmente caratterizzati dalle seguenti caratteristiche:

- riposizionamento di grandi quantità di materiale;
- terreno compatto;
- strati di terreno indistrurbati;
- basso contenuto di contaminazione;
- strati di spessore rilevante;
- attività di dragaggio non ripetitiva.

Chiaramente, un effetto ambientale negativo di queste operazioni é spesso la distruzione degli habitat naturali (bonifica di paludi, smaltimento del materiale scavato in zone biologicamente sensibili...). Comunque, d'altro canto, ulteriori paludi o

zone a marea possono essere ricostruite e possono essere protette dall'erosione aree importanti. Quanto esattamente l'ambiente sia influenzato viene largamente determinato nella fase di progetto. La diffusione dei contaminanti chimici assorbiti dal materiale dragato é generalmente di poco interesse se il materiale da scavare é inalterato. L'ambiente é meglio considerato quando viene integrata nella fase di progetto un'analisi completa delle conseguenze ambientali. É in questa fase che i principali rimedi possono essere presi, come il miglioramento della progettazione, la selezione adatta degli impianti di dragaggio e la selezione informata dei siti. Inoltre, il vantaggioso riutilizzo del materiale dragato può avere un effetto largamente positivo su tutto l'ambiente nella zona di progetto.

Dragaggi di manutenzione - *Maintenance dredgings*

Questo tipo di attività concerne la rimozione dell'insabbiamento dal letto dei canali, fenomeno naturale, in modo da mantenere la profondità di progetto per la navigazione negli stessi e anche nei porti. Le caratteristiche principali sono:

- quantità variabili di materiale;
- terreno molle non compattato;
- eventuale presenza di contaminazione;
- strati sottili di materiale;
- lavoro da farsi con periodicità fissata.

Dal momento che il dragaggio di manutenzione occorre maggiormente nelle zone artificialmente approfondite per la navigazione, non necessariamente si compromette l'ambiente naturale. Il maggior potenziale negativo per l'impatto ambientale é dato dallo smaltimento del materiale dragato e dalla elevata quantità di materiale sospeso durante la fase di dragaggio, che può eventualmente includere dispersione degli inquinanti. Il problema della torbidità può essere controllato con procedure e mezzi adeguati. Tutto ciò é aggravato dalla necessità di fare questo tipo di intervento in modo regolare, in quanto l'insabbiamento é un fenomeno ciclico. Il contenuto inquinante del materiale che deve essere scavato può avere un impatto importante sull'ambiente. Molte città per molto tempo hanno permesso di riversare liquami e rifiuti industriali nei canali facendo in modo che il letto degli stessi si impregnasse di numerosi inquinanti, i quali sono entrati nelle correnti. Il dragaggio può diffondere le particelle alle quali i contaminanti sono attaccati ed aumentare la velocità con cui si diffondono. L'estensione di questo fenomeno dipende dal tipo di equipaggiamento utilizzato e dall'attenzione di tutti coloro impegnati in questi ambiti.

Dragaggi di risanamento/bonifica - *Environmental/Remedial dredgings*

Va sottolineato che entrambi i lavori, infrastrutturale e di manutenzione, possono avere un effetto benefico per quel che riguarda la rimozione del materiale contaminato. I lavori di tipo correttivo, puramente per lo scopo di pulizia della zona di dragaggio, non é sempre considerato come un tipo di dragaggio separato e ha caratteristiche distintive. Esso viene eseguito da una società per correggere azioni passate che, in molti casi, hanno determinato fortemente la contaminazione dei sedimenti. Questo tipo di dragaggio correttivo richiede l'attenta rimozione del materiale dragato ed é quindi collegato all'ulteriore trattamento, riuso e riposizionamento dello stesso. Le sue caratteristiche sono:

- limitate quantità di materiale dragato;
- contenuti altamente inquinati;
- materiale molle, non compatto;
- necessità di interventi periodici.

É quindi un lavoro mirato a rimediare ad una situazione critica esistente, che viene effettuato con grande attenzione e che non danneggia in modo significativo l'ambiente in altri modi. Un prerequisito per un'operazione di dragaggio di questo tipo é la rimozione del materiale inquinato prima dell'inizio di ogni tipo di intervento.

Ognuna di queste tre tipologie di intervento ha scopi diversi, anche se nessuna ha come obiettivo il dragaggio fine a sé stesso; esso é un mezzo per arrivare ad uno scopo come l'approfondimento di un canale, la rimozione di materiale inquinato, la creazione di zone sicure per lo sviluppo commerciale o industriale. Per soddisfare queste intenzioni, l'industria dei dragaggi ha sviluppato una grande varietà di mezzi, ognuno con specifiche caratteristiche.

3.2 I terreni da dragare

La buona conoscenza delle caratteristiche del terreno da scavare rappresenta l'elemento fondamentale del progetto di dragaggio, sia per determinare l'attrezzatura necessaria, sia per calcolarne i costi. Il costo dello scavo di un metro cubo di materiale può infatti variare in un campo da uno a cento. É quindi indispensabile avvalersi di un'indagine geotecnica, con il prelievo di campioni di terreno, la quale possa dare un' indicazione precisa della sua consistenza: argilla, limo sabbia o ciottoli, eventualmente anche roccia. Per la definizione tecnico-economica del progetto si dovranno quindi analizzare preliminarmente le caratteristiche di granulometria, peso specifico, contenuto in acqua, resistenza alla compressione, resistenza al taglio del materiale da scavare.

Nella tabella 3.1, sono riportati i criteri generali per l'identificazione e la classificazione dei terreni da dragare suggeriti dall'AIPCN¹.

La classificazione e l'identificazione delle rocce sono analoghe a quelle utilizzate per la terraferma, anche se lo scavo di roccia è meno usuale in mare. Le prove di laboratorio ed in situ per la determinazione delle caratteristiche dei terreni da dragare, suggerite dall'AIPCN, comprendono la determinazione della granulometria, della forma dei granuli, della densità in situ, della compattezza, del tenore di acqua, dell'indice di plasticità, della resistenza al taglio, del tenore in materie organiche.

Per le modalità di prova può farsi riferimento alle British Standards o a norme equivalenti.

Le prove di laboratorio vanno fatte su campioni freschi; é essenziale che le prove con scissometro e penetrometro siano fatte direttamente sul terreno per essere confrontate con le prove di laboratorio. La compattezza in situ può essere determinata con una qualsiasi prova, compresa la Standard Penetration Test.

¹ *Rapport d'un groupe de travail du Comité Technique Permanent II, Supplement au Bulletin AIPCN n.47 (1984)*

Tipi di terreno	Dimensione grani (mm)	Identificazione	Aspetto dei grani e plasticità	Resistenza al taglio
<i>Grossi ciottoli</i>	> 200 200-60	esame e calibratura visuale	forma dei grani arrotondati irregolari con spigoli screpolati	P.A.
<i>Chiuie</i>	grosse 60-20 medie 20-6 fini 6-2	facilmente identificabile dall'esame visivo	forma dei grani arrotondati irregolari con spigoli screpolati	possibilità di trovare strati di ghiaie cementati o ghiaie compatte miste a sabbie
<i>Sabbie</i>	grosse 2-0,6 medie 0,6-0,2 fini 6-2	granuli visibili ad occhio nudo. Debolissima coesione per terreno secco	tessitura rugosa liscia levigata.	compattezza dei depositi omogenea o stratificata. La miscela con limi o argille può produrre sabbie molto compatte
<i>Limi</i>	grosse 0,06-0,02 medie 0,02-0,006 fini 0,006-0,002	granuli invisibili. La prova di dilatazione permette la migliore determinazione possibile. Il limo può essere impastabile ma secco, una semplice pressione delle dita polverizza la zolla secca	non plastico o poco plastico	in massima parte non plastico: le caratteristiche possono essere identiche a quelle delle sabbie, se la materia è prevalentemente grossa o sabbiosa. Il limo più fino si avvicina all'argilla e ha delle caratteristiche plastiche. Spesso è misto a sabbia e argilla. La consistenza del limo varia dalla fase liquida al limo duro avente consistenza di una pietra
<i>argille</i>	al di sotto dei 0,002 mm la distinzione fra limi e argille non va fatta unicamente in base alla dimensione dei granuli, poiché le più importanti proprietà fisiche dei limi e delle argille non hanno che un rapporto indiretto con la dimensione dei granuli	le argille hanno una coesione e una plasticità significativa ma non reagiscono alla prova di scottimento. I frammenti secchi non si riducono in polvere, ma seccandosi si contraggono e si fessurano presentando un'alta resistenza al taglio	media plasticità forte plasticità	molto molli: <20 kN/m ² molli: 20-40 kN/m ² compatte: 40-50 kN/m ² tenaci: 75-150 kN/m ² dure: >150 kN/m ² la struttura può essere fessurata, intatta, omogenea, stratificata o alterata
<i>Torbe e terreni organici</i>	varie	possono essere identificate per il colore nero o bruno e spesso per il loro forte odore e per la presenza di materie fibrose o legnose		possono essere compatte o spongiose. La resistenza al taglio può variare considerevolmente secondo le direzioni verticale ed orizzontale

Tabella 3.1: Criteri generali per l'identificazione e la classificazione dei terreni da dragare

3.3 Fasi di un progetto di dragaggio

Le caratteristiche di un ciclo di dragaggio cambiano considerevolmente da progetto a progetto. In ogni caso, è possibile identificare un numero di differenti fasi che sono comuni alla maggior parte dei progetti in relazione all'equipaggiamento utilizzato per ogni esecuzione. Le fasi sono le seguenti:

1. *Fase di escavazione o rimozione* - questo processo comporta la rimozione e l'asporto dei sedimenti e/o di rocce dal fondo. Una speciale macchina, draga, viene utilizzata per questi scopi, tramite un'azione meccanica o idraulica o con la combinazione delle due. Gli effetti ambientali più significativi che intervengono durante questo processo sono:
 - aumento dei sedimenti sospesi: durante la fase di escavazione, la coesione del materiale in-situ viene allentata e parte del materiale può essere portato in sospensione a causa del movimento di rotazione o di taglio. La quantità di materiale portato in sospensione dipende dall'energia applicata nello scavo e dal modo con cui il materiale viene sollevato in superficie;
 - mescolamento degli strati: quando viene impiegata un'attrezzatura necessaria per strati spessi, dotata di un movimento di taglio verticale e orizzontale combinato, è difficile evitare di mescolare gli strati stessi. Se il movimento dell'attrezzatura, invece, è solo orizzontale, è più facile controllare lo spessore degli strati;
 - diluizione (nel caso di dragaggio idraulico): per facilitare il trasporto del materiale scavato, viene aggiunta dell'acqua nelle fasi di taglio e aspirazione. Il rapporto acqua/terreno varia a seconda del tipo di draga. Questa variabile è influenzata quando lo spessore dello strato da rimuovere è piccolo rispetto al minimo spessore che la draga può rimuovere.
2. *Sollevamento del materiale* - durante la seconda fase di un ciclo di dragaggio, il materiale rimosso viene sollevato verso la superficie liquida; questa operazione può essere eseguita in modo meccanico o idraulico. Nel primo caso il materiale viene sollevato tramite una benna (draghe a secchie, a cucchiaio o a benna mordente); nel secondo caso le draghe idrauliche (aspiranti con disgregatore, aspiranti stazionarie e aspiranti semoventi) usano un tubo di aspirazione. Il materiale scavato viene aspirato dalla bocca di aspirazione mediante l'uso di pompe centrifughe. Il materiale è poi ulteriormente sollevato per mezzo del tubo di aspirazione verso la pompa e da qui, attraverso la linea di scarico, viene avviato alla stiva della draga. I rischi legati all'ambiente in questa fase sono:
 - rilascio di sedimenti sospesi: nel caso di scavo meccanico con benna aperta, il materiale dragato è a contatto diretto con l'acqua che può determinare una diluizione e un incremento del contenuto dei sedimenti sospesi nella colonna d'acqua sovrastante;
 - fuoriuscita di strati sciolti: con il trasporto idraulico ci sono potenziali problemi relativi alla zona della bocca di aspirazione. Se la capacità di aspirazione è più bassa rispetto alla capacità di scavo della draga, si ha una fuoriuscita di materiale che forma uno strato, il quale rimane sul

fondo del mare. Lo setsso effetto si osserva quando il materiale disgregato cade lentamente nella colonna d'acqua, arrivando alla profondità di aspirazione quando ormai la bocca di aspirazione si è allontanata;

- densità del materiale: si possono avere problemi con il trasporto idraulico in quanto questo metodo richiede l'aggiunta di acqua per ottenere una densità della miscela che sia adatta al pompaggio. La coordinazione tra la capacità di scavo e quella di pompaggio è fondamentale: se la seconda risulta troppo alta, la densità della miscela nella condotta di aspirazione diventa troppo bassa. Questo causa problemi di disidratazione durante la fase di smaltimento o di trattamento, che è ancora più preoccupante nel caso di materiale contaminato;
- trabocco durante il caricamento della tramoggia o delle chiatte: il troppo pieno di acqua in eccesso inevitabilmente porta i sedimenti nelle acque circostanti. Questo è importante specialmente quando si trattano materiali inquinati.

3. *Trasporto del materiale dragato* - la terza fase di un ciclo di dragaggio è il trasporto orizzontale del materiale scavato e sollevato dalla zona di dragaggio a quella di trattamento o di deposito finale. Questo può essere ottenuto principalmente con uno di questi metodi:

- trasporto nella stiva delle draghe stesse o su chiatte;
- pompaggio attraverso tubazioni;
- trasporto su autocarri e nastri trasportatori.

Ciascun metodo è legato al tipo di draga utilizzata: il trasporto su chiatta è generalmente associato allo scavo meccanico, mentre il trasporto tramite condotte è utilizzato con draghe idrauliche. Gli effetti ambientali legati al trasporto possono essere così sintetizzati:

- sicurezza: utilizzando delle chiatte aperte per il trasporto, l'equipaggio può venire direttamente a contatto col materiale dragato. Questo non è fonte di problemi in un normale progetto di dragaggio, ma nel caso di materiale contaminato può sorgere un rischio per la salute;
- diluizione: essa occorre maggiormente con l'uso di draghe idrauliche dove è imposta una densità massima per permettere lo scarico, azionato da pompe centrifughe, tramite condotte;
- fuoriuscita: il rischio maggiore è la perdita di materiale nelle giunzioni tra condotte o la perdita dalle chiatte stesse, specie in condizioni atmosferiche difficili. Può esserci perdita anche nel caso di fondo danneggiato o poco chiuso della chiatta;
- rumore ed inquinamento atmosferico: è un effetto più significativo nel caso di trasporto su chiatta che nel caso di trasporto su condotta.

4. *Collocamento del materiale* - la fase finale di un progetto di dragaggio è il riposizionamento del materiale scavato nella sua destinazione finale o in un sito intermedio per le operazioni di trattamento. In questa fase le possibilità sono notevoli:

- bonifica di un'area;
- ripascimento;

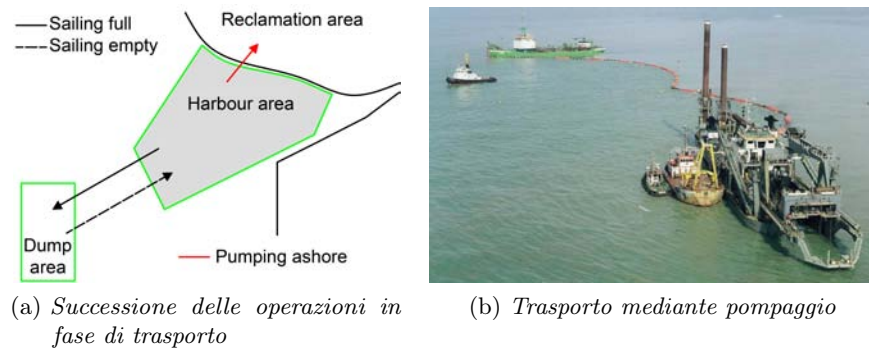


Figura 3.1: Trasporto del materiale dragato

- creazione di zone umide;
- riposizionamento a terra;
- riposizionamento in cava;
- riposizionamento in mare.

Sono degni di nota i seguenti effetti dovuti al riposizionamento:

- occupazione di spazi: l'effetto maggiore, specialmente nel caso di posizionamento a terra, è l'occupazione di terreni e l'alterazione dell'habitat naturale. Lo stesso si ha sott'acqua, con un effetto meno visibile;
- dispersione del materiale depositato: nei siti di stoccaggio subacquei, in relazione alla profondità del mare, gli effetti delle onde e delle correnti possono comportare la dispersione del materiale più fine. A terra invece la stessa azione è svolta dal vento o dalla pioggia;
- rumore ed inquinamento atmosferico: l'operazione di collocamento, specie se effettuata tramite automezzi o altre macchine per il movimento terra, può generare rumore e problemi di inquinamento;
- qualità delle acque sotterranee: se la scelta dell'area di stoccaggio è sbagliata e le misure protettive sono carenti, la perdita di materiale può danneggiare la falda sottostante.

3.4 Attrezzatura di dragaggio

Le attrezzature di dragaggio vanno scelte secondo il tipo di materiale da scavare, la presenza di moto ondoso nella zona di scavo e la quantità globale di scavo da fare. Le draghe sono di diversi tipi e dimensioni ed includono le macchine operanti in acqua e quelle a terra. Le attrezzature di dragaggio si classificano in base alle operazioni di scavo e possono essere raggruppate in questo modo:

- draghe meccaniche;
- draghe idrauliche;
- draghe speciali a basso impatto;
- draghe d'altro tipo.

L'identificazione delle draghe può essere inoltre fatta in base alla propulsione, cioè semoventi o stazionarie. La scelta dell'attrezzatura di dragaggio va fatta sulla

base di una combinazione di fattori come il tipo di ambiente fisico, il metodo di posizionamento e la distanza dal sito di posizionamento ed infine la natura, la quantità ed il livello di contaminazione del materiale da dragare.

3.4.1 Draghe idrauliche

Sono generalmente impiegate in presenza di materiale debolmente compattato e utilizzano principalmente pompe centrifughe. Il materiale viene prelevato e trasportato in forma fangosa o liquida mediante tubi di aspirazione che funzionano a seguito della depressione che si forma nella zona di prelievo. Spesso con draghe idrauliche vengono indicate anche quelle draghe il cui funzionamento si realizza accoppiando entrambe le tipologie, in cui cioè il sistema di escavazione è di tipo meccanico ed il sistema di trasporto del materiale è di tipo idraulico. Queste draghe nascono per soddisfare esigenze specifiche, in quanto permettono di dragare materiali ben compattati limitando i problemi legati alla torbidità e alla fuoriuscita di particelle nella colonna d'acqua. La concentrazione di solido prelevata è intermedia fra quella ottenuta con la tecnica meccanica e quella idraulica. Tra i tanti meccanismi di disaggregazione che vengono spesso applicati a questo tipo di draga c'è anche l'utilizzo di potenti getti d'acqua vicino alla testa di aspirazione, che migliora notevolmente la capacità di escavazione in presenza di materiale più compattato. Il materiale dragato di solito viene depositato nell'area di scarico mediante un'apposita tubazione o viene immesso nella stiva della draga stessa, dalla quale può essere successivamente scaricato tramite un'apertura sul fondo. I sistemi idraulici sono più veloci rispetto a quelli meccanici e provocano una minore sospensione di materiale in quanto, durante le operazioni di dragaggio, una volta captati dalla testa aspirante, non danno luogo a molte fuoriuscite nella colonna d'acqua circostante. Si possono identificare tre principali tipi di draghe idrauliche:

(SD) Suction dredgers - Draghe stazionarie aspiranti

Sono utilizzate per operazioni di scavo di terreni non consolidati costituiti da sabbie o da ghiaia. Hanno come limite principale quello di produrre scavi poco profondi e per questo sono raramente utilizzate per la costruzione di porti o canali. Necessitano di ancoraggi e ormeggi che possono essere di intralcio alla navigazione. È uno strumento molto economico quando può refluire direttamente mediante tubazioni nella zona di colmata.



Figura 3.2: Draga stazionaria aspirante

(CSD) Cutter suction dredgers - Draghe aspiranti con disagregatore

Sono equipaggiate con una testa tagliante che incrementa la capacità di rimozione del materiale della draga. Operano avanzando su due piloni di ancoraggio infissi nel terreno: durante l'operazione di dragaggio la testa tagliante viene mossa da argani meccanici e descrive archi semicircolari che provocano nel fondale incisioni di profondità dell'ordine della decina di centimetri. Il materiale viene poi captato dalla testa della tubazione aspirante e viene poi pompato a riva attraverso tubazioni o collocato su bette. Sono propriamente utilizzate nel caso di materiali ben ompattati come argille, sabbie o rocce tenere.

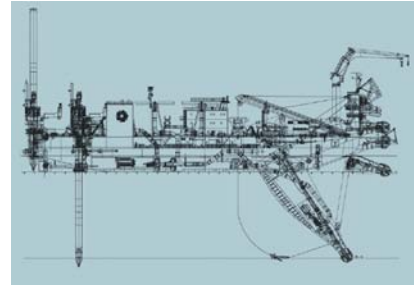
(a) *Draga in navigazione*(b) *Schema*

Figura 3.3: Draga aspirante con disagregatore

(TSHD) Trailing suction hopper dredgers - Draghe aspiranti rifluenti

Hanno un funzionamento tale per cui muovendosi fanno strisciare sul fondale una testa aspirante che preleva il materiale e lo immette nella stiva. Questa tipologia di draga può navigare autonomamente senza bisogno di rimorchiatori od ormeggi e quindi può trasportare il carico anche per grandi distanze. Sono indicate per il dragaggio di tutti i solidi non rocciosi. Il materiale viene poi scaricato per gravità aprendo il fondo dell'imbarcazione o viene pompato a riva tramite tubazioni. Grazie alla loro alta velocità di lavoro e produzione sono utilizzate frequentemente nei progetti di ripascimento o creazione di terraferma e nei dragaggi di mantenimento, ma hanno comunque bisogno di fondali adeguati e di specchi liquidi di ampiezza sufficiente.

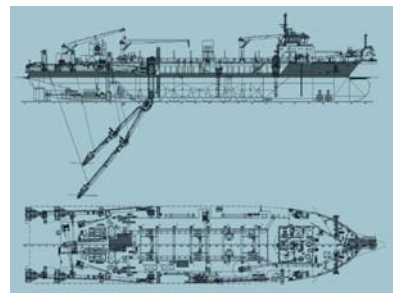
(a) *Draga in navigazione*(b) *Schema*

Figura 3.4: Draga con testa aspirante a strascico

3.4.2 Draghe meccaniche

Sono utilizzate per rimuovere il materiale ghiaioso, duro o compatto mediante tecnologie simili ai metodi di escavo sulla terraferma. Sono indicate nei lavori in

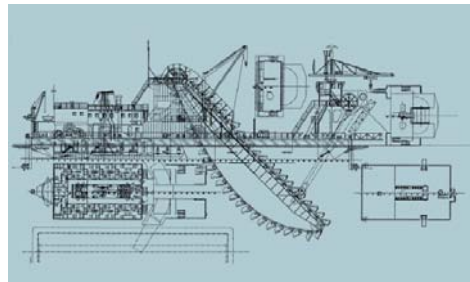
aree di dimensioni limitate. Le draghe meccaniche usano sistemi di escavazione e trasporto che generalmente si possono identificare con benna mordente, cucchiaini meccanici o secchie dove il materiale prelevato attraversa tutta la colonna d'acqua entrando in contatto con l'ambiente circostante. Il materiale dragato viene poi trasportato mediante pontoni e chiatte o attraverso imbarcazioni a tramoggia con apertura sul fondo capaci di percorrere lunghe distanze. I sedimenti coesivi dragati e trasportati con tale metodo rimangono generalmente, durante tutto il processo, intatti, con grandi quantità che mantengono la densità e la struttura che avevano in situ. I principali tipi di draghe meccaniche sono:

(BLD) Bucket ladder dredgers - Draghe a secchie

Utilizzano una serie di contenitori, 'secchie', montati su di un nastro semovente. Ruotando, raccolgono e trascinano il materiale in superficie per poi scaricarlo su bette affiancate alla draga. Possono essere adoperate per un'ampia varietà di sedimenti compresi quelli formati da roccia soffice. Hanno un rendimento basso nell'argilla e non molto alto nella sabbia a causa di un non completo riempimento delle secchie. Sono andate scomparendo a causa della loro bassa velocità di produzione, per l'alto livello di rumorosità e anche per la necessità di disporre di grossi ormeggi che sono di ostacolo alla navigazione. Hanno inoltre il difetto di provocare un'elevata dispersione del materiale nella colonna d'acqua, dovuta anche al fatto che l'aria intrappolata nelle secchie durante la risalita tende a spingere fuori parte del materiale raccolto.



(a) *Draga in navigazione*



(b) *Schema*

Figura 3.5: Draga a secchie

(BHD) Backhoe dredgers - Draghe a cucchiaio

Hanno un funzionamento simile agli escavatori meccanici di terra: sono infatti caratterizzate da un escavatore a cucchiaio installato sul ponte di un'imbarcazione munita di piloni d'acciaio di ancoraggio. Il materiale scavato viene portato in superficie e depositato su chiatte per il trasporto. Sono attrezzi di uso limitato, con elevati costi di esercizio, impiegati per lo scavo di materiale compatto, eterogeneo ma che hanno come limite il fatto di non poter raggiungere profondità troppo elevate.

(GD) Grab dredgers - Draghe a benna mordente

Sono equipaggiate con una benna mordente manovrata da un braccio meccanico collocato sul ponte dell'imbarcazione. L'operazione di dragaggio viene eseguita facendo scendere la benna sul fondale, chiudendola e facendola risalire in superficie dove il suo contenuto viene scaricato su delle bette affiancate alla draga. È



Figura 3.6: Draga a cucchiaio

un'attrezzatura di uso flessibile, adatta all'esecuzione di modeste quantità di lavoro, dato che ha costi unitari elevati; è particolarmente indicata per interventi di escavo in zone difficilmente accessibili. Un altro limite è dato dal fatto che produce delle irregolarità nella conformazione del fondale.



Figura 3.7: Draga a benna mordente

Nella tabella 3.2 sono riportate le principali differenze tra la tecnica del dragaggio meccanico e quella del dragaggio idraulico, mentre nella tabella 3.3 sono indicati i rispettivi parametri di valutazione qualitativa.

3.4.3 Dragaggio per turbolenza

Con questa tecnica di dragaggio non c'è bisogno di sollevare il materiale in superficie prima che sia trasportato. Il trasporto orizzontale infatti è ottenuto tramite forze naturali, in un modo meno controllato però rispetto agli altri metodi appena descritti. In questa categoria rientrano due principali tipi di draghe: quelle ad iniezione idraulica e quelle a vomero subacqueo.

La tollerabilità nei confronti dell'ambiente, nell'uso di questo sistema, dovrebbe sempre essere considerata nella fase preliminare di un progetto di dragaggio in modo tale che possano essere incluse appropriate condizioni contrattuali.

(WID) Water injection dredgers - Draghe ad iniezione idraulica

Queste attrezzature gettano una grande quantità di acqua sugli strati superficiali del fondo, di conseguenza, la densità del materiale diminuisce e la parte

Tecnica	Principali vantaggi	Principali svantaggi
<i>Dragaggio idraulico</i>	<ul style="list-style-type: none"> • tasso di escavazione elevato ($7\,000\text{ m}^3/h$) • bassa risospensione del materiale nella colonna d'acqua • facilità di trasporto per lunghe distanze 	<ul style="list-style-type: none"> • la presenza di trovanti e bolle di gas nei sedimenti può alterare il funzionamento delle pompe • elevato contenuto in acqua del materiale scavato (80 % - 90 %) • utilizzo generalmente riservato per grandi quantitativi • Costi elevati
<i>Dragaggio meccanico</i>	<ul style="list-style-type: none"> • buona precisione nel prelievo del sedimento • il sedimento viene conservato integro con bassa percentuale di acqua • tecnica utilizzabile anche per raggiungere profondità elevate 	<ul style="list-style-type: none"> • tasso di escavazione molto basso • inutilizzabile per sedimenti molto idratati • percentuale elevata di messa in sospensione del materiale nella colonna d'acqua

Tabella 3.2: Principali differenze tra il dragaggio idraulico e quello meccanico

superiore si solleva leggermente. Il materiale inizia a muoversi naturalmente fino a raggiungere uno stato di equilibrio. Nel caso di pendenza, anche piccola, nell'area di dragaggio, la distanza di trasporto può essere rilevante. Il materiale si deposita in una zona adiacente a minore pendenza.

Le WID sono draghe che non possono essere utilizzate nei progetti ambientali in quanto il materiale non viene fisicamente rimosso ma semplicemente spostato in un altro posto, in un modo piuttosto incontrollato e meno prevedibile. Ad ogni modo, possono essere impiegate con alcuni vantaggi in quelle zone meno sensibili a questo tipo di problema.

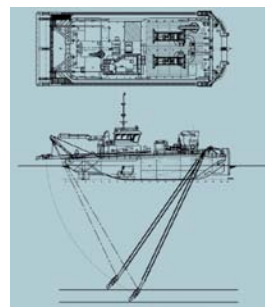
(a) *Draga in esercizio*(b) *Schema*

Figura 3.8: Draga ad iniezione idraulica

(UWP) Underwater plough - Draghe a vomero subacqueo

Possono essere descritte come un grande telaio che viene tirato sul fondo da un rimorchiatore; il telaio è equipaggiato con delle lame che raschiano gli strati superficiali del fondo. Il materiale scavato rimane davanti alle lame e viene poi spinto in avanti finché il volume del raccoglitore non è pieno. A questo punto il processo deve essere interrotto altrimenti il materiale fuoriesce dal raccoglitore e va parzialmente in sospensione.

Parametro di valutazione	Dragaggio idraulico	Dragaggio meccanico
• Quantitativo di sedimento da dragare		
piccolo ($< 5\,000\, m^3$)	+	++
medio ($5\,000 \div 100\,000\, m^3$)	+	+
elevato ($> 100\,000\, m^3$)	++	-
• Consistenza del sedimento		
duro	-	+
molle	+	++
fluida	++	-
• Capacità lavorativa a quote profonde	+	++
• Manovrabilità	+	++
• Costi	++	+
• Facilità di trasporto del sedimento	++	+
• Precisione nel dragaggio	+	+
• Risospensione nell'area di dragaggio	+	-
• Risospensione nell'area di scarico	-	+
• Capacità di controllo della risospensione	+	-

Tabella 3.3: Valutazione qualitativa tra il dragaggio idraulico e quello meccanico

Il sistema UWP viene maggiormente impiegato nei dragaggi di manutenzione nei bacini a marea, dove si depositano grandi quantità di sedimenti. Il materiale o viene spinto indietro verso la corrente principale in modo da reintrodurlo nel naturale processo di trasporto del canale, o viene spostato in zone dove altre attrezzature di dragaggio non hanno accesso e dove potrà essere successivamente rimosso tramite un normale dragaggio. Questo tipo di operazione non può essere usata nei progetti di dragaggio ambientale in quanto è impossibile controllare effettivamente il processo di trasporto e di deposito ed anche perchè il materiale non viene rimosso dal suo sistema naturale. In altri progetti però, può essere una valida alternativa, preferibile per i minori costi di esercizio.

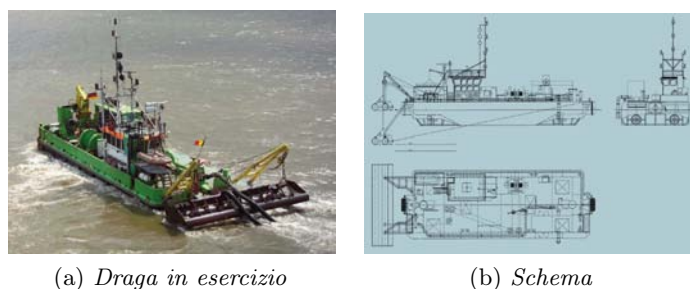


Figura 3.9: Draga a vomero subacqueo

3.5 Progressi recenti nell'attrezzatura di dragaggio

Oltre allo sviluppo di nuove attrezzature, progettate specialmente per i dragaggi infrastrutturali, una spinta notevole è stata data al potenziamento e all'ottimizzazione degli strumenti esistenti.

Negli ultimi anni è avvenuto un notevole cambiamento rispetto ai vincoli imposti alle attività di dragaggio, in risposta alle considerazioni e alle limitazioni legate all'ambiente.

Questo ha comportato un ripensamento generale sia dal punto di vista concettuale che tecnico, di tutta l'attività di dragaggio; ha determinato anche un adattamento continuo dei macchinari tradizionali per migliorare la capacità degli stessi di far fronte a nuovi vincoli.

Le maggiori innovazioni che hanno guidato questi cambiamenti sono:

- aumento della precisione del dragaggio in modo da diminuire i volumi dragati;
- diminuzione di produzione di sedimenti sospesi nell'area di dragaggio e di deposito, in modo da evitare problemi derivanti da materiale leggermente o fortemente inquinato;
- miglioramento delle possibilità di monitoraggio e controllo a bordo per abilitare l'equipaggio a riconoscere e correggere effetti e tendenze nella fase iniziale;
- sviluppo di metodi di scavo 'strato per strato' per realizzare un dragaggio selettivo degli strati con contenuti di contaminazione differenti;
- diminuzione delle perdite di materiale dagli strati facilmente erodibili: questo previene problemi di dispersione nel caso di materiale inquinato;
- incremento nella fase di trasporto della densità del materiale dragato, in modo da diminuire il volume avviato ad ulteriori trattamenti e in modo da ridurre il tempo per la piena consolidazione e maturazione del materiale nelle zone di deposito a terra;
- aumento nel controllo automatico, per garantire un processo continuo e permettere all'equipaggio di concentrarsi sui controlli principali, lasciando le operazioni ripetitive al sistema di controllo automatico.

3.5.1 Innovazioni per tutti i tipi di draghe

Dredging Information System

Recentemente vi è stato un notevole progresso nel monitoraggio delle attività di dragaggio, sia a bordo delle imbarcazioni usando un sistema continuo di registrazione dei dati, sia negli uffici tramite il Dredging Information System.

Questi sistemi registrano continuamente una grande quantità di variabili come la profondità di dragaggio, la posizione, i volumi, la concentrazione, i vuoti, la pressione, la velocità di rotazione, il consumo di energia.

I dati sono elaborati automaticamente e vengono inviati sia ad un sistema di controllo e di guida, automatico, sia ad un sistema di feedback in tempo reale, ad uso del direttore del lavoro di dragaggio e supervisione.

Sistemi di controllo automatico

Lo sviluppo di sistemi di informazione e monitoraggio ha comportato un incremento nell'uso di sistemi di controllo automatico a bordo delle draghe.

Ciò permette al direttore del lavoro di concentrarsi sulla parte creativa, ossia l'ottimizzazione ed il miglioramento del ciclo di dragaggio. Diretta conseguenza è il bisogno continuo di sistemi di misura accurati per tutte le variabili che rientrano nel processo: la qualità delle informazioni a disposizione, sono così migliori.

3.5.2 Innovazioni per draghe idrauliche

Sistema di degassazione

Un fattore che limita la densità della miscela pompata dalle pompe centrifughe è il gas contenuto nel materiale sul fondo. In questi casi può avvenire cavitazione a seguito del rapido aumento della pressione nei sedimenti/miscela caratterizzati da un contenuto di gas troppo elevato.

È necessario quindi ridurre il contenuto di gas prima che la miscela entri nella pompa di aspirazione e questa strada è stata seguita da vari cantieri navali e costruttori.

Il risultato è un aumento della densità nella condotta di trasporto o nelle draghe semoventi ad aspirazione e quindi una diminuzione nei volumi da depositare.

Green TSHD

Uno dei vincoli maggiori per questo tipo di draga è il *troppo pieno*, ossia lo scarico a mare che avviene tramite gli sfioratori superficiali: ciò genera un aumento di torbidità nella colonna d'acqua, caratterizzato da un elevato contenuto di sedimenti fini. Un modo per ovviare a questo problema è fermare il dragaggio quando la draga è piena, anche se è un'operazione non economica all'interno del ciclo di dragaggio; sono quindi state introdotte nuove tecnologie, come, ad esempio:

- riversamento controllato per migliorare la capacità di accumulo della draga;
- riversamento controllato, tramite un sistema di guida nel tubo di aspirazione, che direziona l'acqua in eccesso sulla parte più bassa della colonna d'acqua;
- rimorchi con migliori caratteristiche per il contenimento del materiale;
- riutilizzo o ricircolazione dell'acqua in eccesso nei getti installati sulla draga; questo ha permesso di ridurre notevolmente l'eccesso di acqua che viene scaricata in mare e la dispersione dei sedimenti più fini nella zona di dragaggio;
- uso di pompe sommerse, ottenendo così una maggiore densità del materiale da dragare.

3.5.3 Innovazioni per draghe meccaniche

Sistemi di controllo e monitoraggio

L'innovazione più significativa per migliorare la precisione delle attrezzature relative al dragaggio meccanico, specialmente per le BHD e per le GD, è il continuo monitoraggio al computer della posizione della benna sott'acqua. I sistemi più sofisticati memorizzano le operazioni di dragaggio evitando di andare a scavare ancora nello stesso posto.

Per le GD esistono sistemi aggiuntivi per definire preventivamente la profondità di scavo, in modo da evitare profondità diverse da un ciclo all'altro.

Per le BLD sono stati sviluppati sistemi che controllano automaticamente il movimento del pontone su di una curva predefinita.

Sistemi di posizionamento

Un maggiore aiuto alla precisione nel dragaggio è stato lo sviluppo di sistemi di posizionamento più sofisticati e l'applicazione di alcuni di essi per misurare

continuamente, con la precisione del centimetro, l'attuale posizione e la profondità di scavo.

Questo è ottenuto utilizzando dei DGPS che sono installati sul braccio della draga, così risulta possibile misurare istantaneamente i movimenti della testa tagliente e correggerne la posizione automaticamente o manualmente.

Come conseguenza, le draghe meccaniche possono essere utilizzate per progetti di dragaggio ambientale, cosa che non era tollerabile prima a causa dell'imprecisione del profilo di scavo. Ciò ha introdotto la possibilità di scavare materiale contaminato con densità quasi come quelle in situ.

Benne speciali

Per ridurre l'imprecisione relativa alla profondità di penetrazione ad ogni ciclo, è stato sviluppato un nuovo tipo di benna, dotata di un sistema di chiusura appositamente progettato che mantiene i bordi taglienti della benna stessa ad una profondità costante (figura 3.10). Questo ha consentito di ridurre il volume di



Figura 3.10: Benna a schermo

‘sovra-dragaggio’ necessario ad eliminare un dato volume di materiale contaminato: si riduce quindi anche il volume da immagazzinare o da avviare a trattamenti successivi.

Un altro strumento recente è la benna chiusa: sollevando il materiale tramite un benna aperta c'è il pericolo di aumentare la quantità di sedimenti sospesi; questo è mitigato da un nuovo tipo di benna che, quando chiusa, racchiude completamente il materiale raccolto facendo sì che il contatto tra il materiale scavato e la circostante colonna d'acqua sia minimo.

Encapsulated bucket line

Il maggior vincolo delle BLD consiste nell'uso di benne aperte per scavare e sollevare il materiale: l'acqua circostante entra a contatto diretto con le benne ed il loro contenuto, il quale risulta essere in turbolenza durante il sollevamento e, conseguentemente, provoca la sospensione di sedimenti nella zona, che sono poi diffusi grazie al naturale movimento dell'acqua.

Questo è inaccettabile per i progetti di tipo ambientale e come rimedio è stato realizzato un tipo di draga chiusa: la benna viene sollevata in acque ferme e, anche se si hanno perdite, esse rimangono confinate in un'area racchiusa e portate sul fondo del fiume o del mare.

Grazie a questa innovazione si riduce notevolmente la torbidità causata dalle BLD in fase di sollevamento del materiale e di conseguenza esse possono essere utilizzate nei progetti ambientali.

3.6 Attrezzature di trasporto

3.6.1 Trasporto tramite condotta

Questo tipo di trasporto è fondamentalmente un metodo che rispetta l'ambiente e, comparato con gli altri metodi di trasporto, realizza un basso consumo di energia ed inoltre l'inquinamento acustico e dell'aria è quasi inesistente. Viene utilizzato generalmente per il trasporto del materiale dragato sia esso incontaminato o inquinato: risulta quindi un sistema pulito in quanto avviene all'interno di un circuito chiuso. Gli unici punti di contatto con l'ambiente esterno sono la bocca di aspirazione e lo sbocco nella zona di stoccaggio: tra queste due sezioni non c'è possibilità di contatto tra il materiale trasportato e l'ambiente a meno che non intervenga una rottura nella condotta stessa.

La rottura totale di una condotta è un fenomeno molto raro ed il controllo delle perdite può essere indagato quando il materiale trasportato è fortemente contaminato.

Nella maggior parte dei casi comunque, l'impatto dovuto ad una piccola perdita può essere trascurato ed è meno significativo rispetto al potenziale rischio di contaminazione degli altri metodi di trasporto.

Per migliorare questo sistema di trasporto sono stati impiegati degli accorgimenti, ed altri ancora potrebbero essere sviluppati:

- i recenti sistemi di controllo automatico includono un dispositivo di monitoraggio delle pompe ed un sistema di guida per un processo di deflusso più regolare con minori valori nei picchi della densità della miscela. Motivi fisici limitano i picchi più alti della densità e questo permette di ottenere una densità media della miscela nella condotta;
- interruzioni regolari nel processo di dragaggio alla fine di ogni movimento oscillatorio e durante le fasi di ancoraggio e di carico del materiale, sono le cause principali dell'aggiunta di acqua nella condotta di trasporto; l'introduzione di una serie di cuscinetti tra le sezioni di aspirazione e di scarico, impediscono all'operatore di interrompere la fase di aspirazione nei periodi morti. Questo permette di evitare interruzioni nella fase di scarico del materiale nei periodi di inattività;
- l'uso di pompe ad alta densità riduce notevolmente il bisogno di aggiungere acqua per il trasporto anche se, come difetto, hanno delle capacità di sbocco piuttosto limitate;
- nel caso in cui la condotta di trasporto richieda l'uso di una chiatta di scarico, bisognerebbe considerare il processo di ritorno dell'acqua dal sito di stoccaggio alla draga ed il ricircolo dell'acqua stessa per lo scarico.

Il più grande svantaggio di questo metodo risulta la necessità di mescolare il materiale dragato con l'acqua di trasporto e questo fa aumentare il volume necessario allo stoccaggio o ai trattamenti successivi che, in caso di contaminazione, possono essere un problema serio.

3.6.2 Trasporto su chiatta

Il secondo tipo di trasporto, frequentemente adottato nei lavori di dragaggio, è quello tramite chiatta o container: in questo caso, il materiale dragato viene depositato in modo idraulico o meccanico all'interno di un'imbarcazione. Il



Figura 3.11: Esempio di trasporto tramite condotta

trasporto orizzontale tra il sito di dragaggio e l'area di stoccaggio o di trattamento viene quindi fatto tramite la navigazione di una chiatta. È questo un sistema che comporta inquinamento acustico, dell'aria e problemi di traffico marittimo.

Il principale vantaggio consiste nel non dover utilizzare acqua per il trasporto in quanto il materiale scavato può essere prelevato alla sua densità originaria, che quindi può essere mantenuta, ad eccezione della TSHD, che, con l'uso di pompe idrauliche, convoglia il materiale dal fondo all'interno della nave.

Il rischio più evidente deriva dal fatto che la maggior parte delle chiatte è di tipo aperto e ciò comporta la possibilità che il materiale fuoriesca. Inoltre vi è il rischio che l'equipaggio entri in contatto col materiale dragato, il che può presentare un problema nel caso in cui quest'ultimo sia inquinato.

Un elemento importante nel controllo è assicurare la regolare ispezione delle chiatte, nonché la loro manutenzione. Per migliorare gli aspetti appena menzionati



Figura 3.12: Esempio di trasporto su chiatta

sono stati sviluppati nuovi approcci:

- per evitare la fuoriuscita di materiale dalla chiatta durante il trasporto è utile coprirla con un telo, oppure ricordando continuamente agli addetti di lasciare uno spazio sufficiente (almeno 50 cm), al di sopra dei sedimenti caricati. Un'altra possibilità è quella di lasciare i sedimenti fermi per un certo periodo dopo la fase di carico: l'acqua può essere pompata fuori prima che abbia inizio il trasporto;
- per la procedura di scarico, la chiatta viene svuotata aprendo il fondo in una zona di deposito sott'acqua oppure utilizzando un'altra imbarcazione che

scarica il materiale in modo idraulico, la quale però necessita di una notevole diluizione nella fase di aspirazione. Per evitare questo è meglio utilizzare il sistema meccanico, in modo tale che il materiale mantenga la sua densità.

3.6.3 Trasporto su strada

Il trasporto su strada è da considerare quando il sito di destinazione del materiale non è nelle vicinanze di un corso d'acqua navigabile.

Le opportunità per questo tipo di trasporto sono limitate, in ogni caso, i vantaggi consistono nel fatto che gli automezzi possono essere riempiti meccanicamente con qualsiasi densità e che la scelta della destinazione è flessibile. Il principale svantaggio deriva dal numero elevato di automezzi necessari al trasporto del materiale ed al conseguente inquinamento prodotto, il quale risulta certamente maggiore rispetto a quello prodotto dal trasporto su condotta.

Questo tipo di trasporto quindi può essere utilizzato in determinate situazioni:

- dove il materiale è altamente inquinato ed il costo per il trattamento dell'acqua di trasporto risulta elevato;
- dove lo scavo è realizzato in modo meccanico;
- dove il materiale dragato ha differenti caratteristiche e quindi differenti destinazioni.

3.7 Tecniche di deposito

Il deposito del materiale dragato nel sito di stoccaggio è un'altra fase importante nel processo di dragaggio, che, potenzialmente, può avere significativi effetti sull'ambiente: occorre selezionare queste aree e le relative infrastrutture nel modo più appropriato.

In aggiunta, le attrezzature e le tecniche utilizzate per lo stoccaggio del materiale hanno un'influenza sugli effetti ambientali complessivi del dragaggio.

3.7.1 Deposito a terra

Un'opzione per il posizionamento del materiale dragato è a terra, entro un'area confinata e circondata da arginatura: questo sistema è applicato quando il materiale deve essere usato a terra o quando esso risulti contaminato e quindi deve essere depositato in un'area di stoccaggio a terra.

Per avviare il materiale a terra, vengono utilizzate delle pompe, installate a bordo delle draghe, che, tramite condotte, lo convogliano nella zona prescelta. Con questa procedura, gli effetti ambientali più significativi sono:

- interrimento di superfici;
- cambiamento della topografia;
- perdita dell'acqua (contaminata) di trasporto negli strati sub-superficiali del terreno.

Un problema che può intervenire in questa fase è la rottura delle arginature o la tracimazione del materiale sopra di esse: l'ambiente circostante risulterà quindi danneggiato. Per evitare tutto questo occorre un adeguato progetto degli argini e un controllo del livello dell'acqua al loro interno.

Un'altra voce problematica è l'evacuazione dell'acqua di trasporto in eccesso: essa contiene una piccola parte di materiale fine che è in fase di deposito nell'area di stoccaggio e, se questo risulta contaminato, l'effetto sull'ambiente può essere pericoloso. Per di più, la quantità di fine che passa attraverso la sezione terminale può generare occlusioni alle canalette usate per allontanare l'acqua di trasporto.

La realizzazione di vasche di colmata può essere un'ulteriore misura di sicurezza nella quale devono essere imposte limitazioni molto restrittive sul contenuto dei sedimenti sospesi relativi all'acqua di trasporto. Bisognerebbe inoltre chiudere la sezione terminale del bacino durante la fase di deposito del materiale ed interrompere i lavori ogni volta che l'area è riempita alla sua capacità massima in modo tale che, lasciando depositare il materiale per qualche giorno, venga allontanata l'acqua contenente, ormai, una minore quantità di sedimenti sospesi. Per evitare



Figura 3.13: Zona confinata per il deposito del materiale dragato

di interrompere le operazioni di deposito è consigliabile realizzare più casse di colmata in serie, che quindi possono essere utilizzate contemporaneamente.

In ogni caso è opportuno studiare adeguatamente le condizioni ambientali della zona prescelta per lo scarico per valutare eventuali rischi o prendere le necessarie precauzioni come, ad esempio, il riposizionamento del materiale in una zona meno vulnerabile o l'installazione di rivestimenti di protezione come quelli in HDPE (High-density polyethylene) o in materiale naturale.

3.7.2 Deposito in mare

Quando il materiale dragato risulta pulito o leggermente inquinato può essere depositato in mare, se sono disponibili aree adatte.

Generalmente lo stoccaggio sott'acqua avviene dopo il trasporto orizzontale su chiatta: l'imbarcazione naviga direttamente dalla zona di dragaggio a quella di deposito e qui viene aperto il fondo della stessa in modo che il materiale si riversi sul letto del fiume o sul fondale marino.

Anche in questo caso, la scelta di un sito ha un grande effetto sulle conseguenze ambientali del progetto. Una zona con un'importante escursione di marea o sollecitata da forti correnti comporta un rischio di erosione, risospensione e successiva dispersione del materiale nei dintorni. In altri casi invece vengono deliberatamente scelte zone come quelle appena citate per sfruttare le correnti stesse.

Il danno ambientale può essere ridotto utilizzando, al posto dell'apertura sul fondo della chiatta, una pompa collegata ad una condotta verticale che raggiunge il fondo in modo da convogliare il materiale verso la sua destinazione finale senza contatto con gli strati d'acqua intermedi: si riducono notevolmente in questo modo perdite di sedimenti fini e dispersioni. Per massimizzare questo risultato è possibile installare nella sezione terminale un diffusore, il quale ha due scopi principali:

- cambiare la direzione del flusso della miscela da verticale, nella condotta, ad orizzontale, sul fondo del mare: questo riduce sia il deflusso della corrente sugli strati appena depositati che la risospensione del materiale;
- ridurre la velocità della miscela allo sbocco da $4 \div 5$ m/s, nelle normali condotte di scarico, a meno di 0.5 m/s: diminuisce così l'erosione sugli strati appena scaricati.

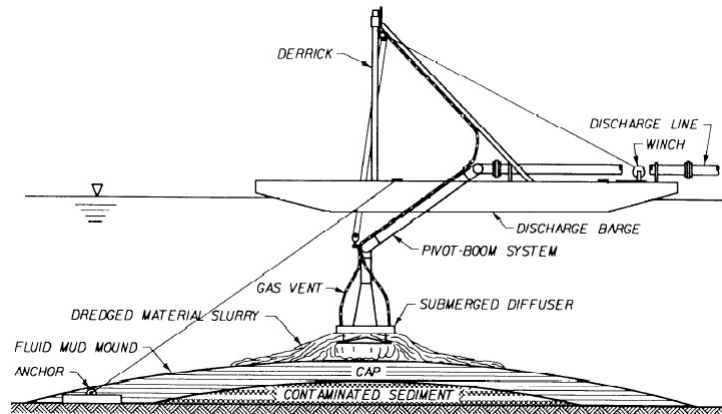


Figura 3.14: Sistema di diffusione subacqueo

Altro metodo per ridurre l'effetto ambientale nel processo di scarico è quello di limitare il periodo durante il quale è permesso il deposito: evitare il deposito sott'acqua quando la marea è massima o durante le stagioni in cui nell'area c'è un'intensa attività biologica, (Smits 1998).

Capitolo 4

Materiale dragato come risorsa

Come precedentemente osservato, il materiale dragato è essenziale per la manutenzione e lo sviluppo di porti e vie di navigazione, per la bonifica e la gestione delle inondazioni: tutte queste attività comportano la creazione di grandi volumi di materiale, che quindi può diventare una risorsa preziosa, anche se gran parte di esso non viene utilizzata a causa di vincoli economici, logistici, legislativi o ambientali.

Molti paesi già si sono orientati verso un uso intensivo di questa risorsa, come il Giappone, dove viene utilizzato più del 90 % del materiale stesso, in altri invece ci sono molti limiti che ne impediscono usi diversi: prima di tutto il costo, generalmente più elevato rispetto alle normali modalità di smaltimento, in secondo luogo la difficoltà di trovare progetti adatti per l'utilizzo del materiale nel momento opportuno o mercati adeguati ed infine la complessa e inadeguata legislazione. Spesso anche l'opinione pubblica risulta essere negativa.

Le possibilità di impiego possono essere classificate principalmente in due gruppi:

- uso ingegneristico, per la realizzazione di materiali da costruzione, isolamento, difesa dalle inondazioni e ripascimento;
- uso ambientale, come la creazione o il miglioramento di habitat, la manutenzione di luoghi con deficit di sedimenti o altro.

I fattori che devono essere considerati per il successo dell'utilizzo del materiale dragato come una risorsa includono:

- comunicazione - l'imperativo deve essere ottenere la fiducia da parte della gente, dalle autorità di regolamentazione e dalle più ampie parti interessate;
- aspetti economici - tenendo conto del risparmio sui costi per le risorse primarie e facendo una corretta valutazione di costi e benefici per la società;
- legislazione - è importante assicurare che politiche nazionali dove non collochino il materiale dragato involontariamente nella legislazione sui rifiuti;
- coordinazione - tra domande ed offerta essa è strategica e può essere realizzata a scala locale, regionale o di bacino;
- aspetti tecnici e amministrativi - dove la pianificazione e soluzioni particolareggiate per ogni sito sono necessarie;
- aspetti ambientali - dove la giusta conoscenza dei processi naturali è fondamentale per un'adeguata valutazione del rischio e per i miglioramenti dal punto di vista ambientale.

Le tradizionali modalità di stoccaggio in acque aperte nella gestione del materiale dragato sono spesso percepite come fonte di rischio per le risorse ambientali. L'alternativa principale in passato, soprattutto per il materiale contaminato, era quella di disporlo in una struttura di smaltimento confinata (CDF), ma in molte zone queste capacità iniziarono ad essere troppo costose da costruire e sollevarono molti dubbi in merito agli effetti ambientali che producevano.

Queste strutture vedono progressivamente ridotta la propria capacità di contenimento a livelli critici, fino al punto in cui è necessario rimuovere e trattare il materiale all'interno per creare spazio per quello appena dragato. In alcuni posti scarseggiano le materie prime e potrebbero essere rimpiazzate da materiali secondari come quelli dragati.

La classica gestione del materiale dragato solitamente comporta la rimozione di sedimenti da un dato canale, attività che per sua natura crea rischi per il contesto ambientale, essa infatti può alterare la struttura morfodinamica ed ecologica di un dato sistema, dimostrandosi un potenziale effetto, uguale o addirittura maggiore, a quello dovuto allo smaltimento in mare aperto.

Quindi, nella considerazione delle varie possibilità, vi è la necessità di assumere in modo olistico il sistema in cui ha luogo il dragaggio, in modo da includere i potenziali effetti di una data strategia di gestione in una prospettiva più ampia.

In aggiunta ad una sistemazione sostenibile del materiale, la gamma di impieghi si è diversificata enormemente negli ultimi anni includendo la costruzione di strade, la bonifica di siti industriali in abbandono, la realizzazione di materiali da costruzione, la creazione di habitat e paesaggi, ma ulteriori impieghi possono essere conseguiti con un trattamento preliminare dei materiali dragati.

4.1 Domanda ed offerta

Il materiale dragato può essere usato direttamente, come aggregato, può essere convertito in materiale da costruzione (laterizi), utilizzato per argini, terrapieni o spiagge, impiegato per soddisfare il deficit di sabbia nelle zone soggette ad erosione e per costruire nuove zone umide.

Il suo utilizzo potenziale dipende dal tipo di materiale, da come e dove è stato prelevato, dalla disponibilità e dalle sue caratteristiche ingegneristiche ed ambientali. Per questo è molto importante che l'offerta di sedimenti incontri il bisogno di interventi nelle vicinanze e che avvenga nei tempi più congrui. Allo stesso modo può essere necessario modificare il progetto in modo che corrisponda alle caratteristiche dell'offerta disponibile.

In Giappone, ad esempio (figura 4.1), viene utilizzato più del 90 % del materiale dragato: parte di esso, dopo il posizionamento iniziale a terra, viene successivamente destinato ad altri scopi. Al contrario, in Europa, si evidenzia (tabella 4.1 e figura 4.2) che meno del 10 % del materiale viene impiegato direttamente, anche se queste cifre non comprendono la riqualifica sostenibile nei fiumi e nelle vicinanze dei sistemi costieri dove il materiale potrebbe aiutare a compensare il bisogno di sedimenti.

La qualità e la quantità del materiale dragato sono questioni critiche, assieme al momento della domanda: la tempistica di un progetto di dragaggio di manutenzione o di investimento raramente coincide con quella del progetto che invece richiede il materiale e, anche qualora dovessero coincidere, il dragaggio può essere controllato dai tempi dettati dall'ambiente, per ridurre gli effetti sull'ecosistema.

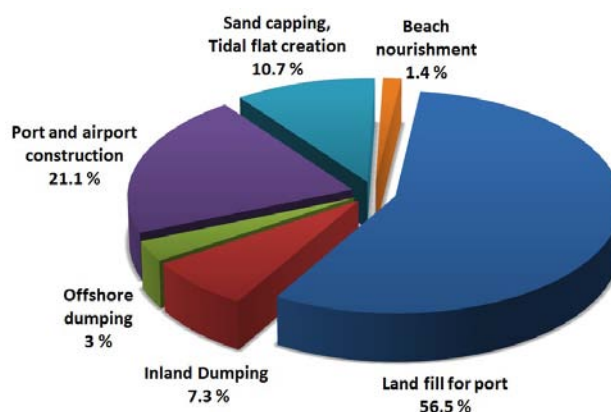


Figura 4.1: Uso del materiale dragati in Giappone

Country	Sea	Inland	Total
Belgium	5	9	14
Denmark	5		5
France	50	6	56
Germany	41	5	46
Ireland	1		1
Italy	4		4
Netherlands	19	9	28
Portugal	4		4
Spain	9		9
Sweden	1		1
UK	30	1	31
sum			198

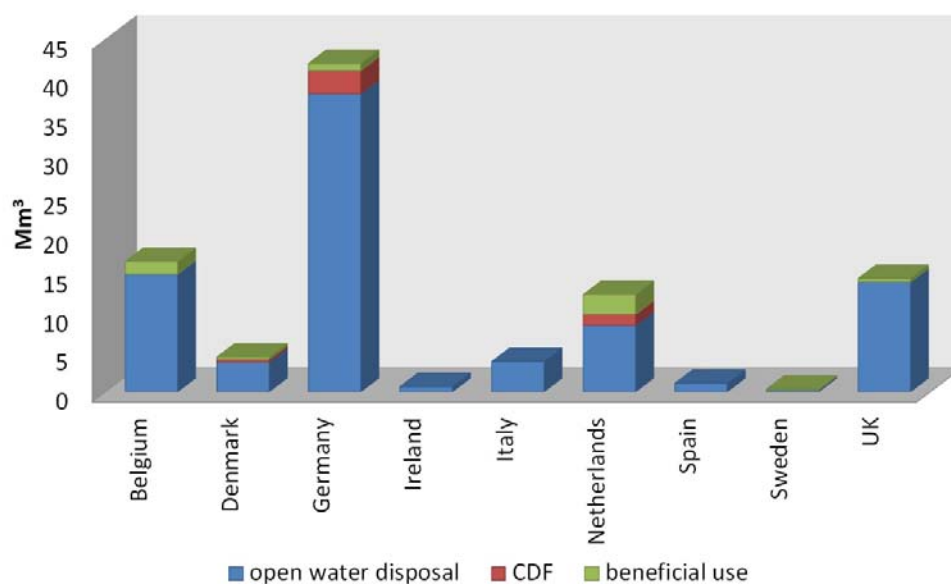
Tabella 4.1: Volumi annui di materiale dragato in Europa Mm³

Figura 4.2: Risultati del questionario del CEDA sull'uso del materiale dragato in Europa, Aprile 2005

4.2 Tipologie di materiali impiegabili

Il fatto che il materiale dragato possa essere utilizzato completamente o meno non dipende solo dal grado e dal tipo di contaminazione, ma anche dalle sue caratteristiche fisiche, come la dimensione dei grani, che determina per larga parte le possibilità d'uso, ingegneristiche ed ambientali, del materiale stesso.

La classificazione a seconda delle dimensioni dei grani prevede cinque gruppi: roccia, ghiaia e sabbia, argilla consolidata, argilla e limo e altre miscele.

- **Roccia** - può essere roccia debole (arenaria o corallo) o dura (granito e basalto); i frammenti variano in dimensione da piccoli a grandi, in relazione all'attrezzatura di dragaggio utilizzata e in relazione al materiale stesso. Solitamente non è contaminata e può essere utilizzata come materiale da costruzione e anche per interventi in habitat acquatici o non.
- **Ghiaia e sabbia** - sono generalmente considerate i materiali più versatili, che necessitano di un minore trattamento dopo l'operazione di dragaggio. Il materiale granulare può essere impiegato per ripascimenti, parchi ricreativi ed altro.
- **Argilla consolidata** - varia da debole a dura e si ottiene di norma da un dragaggio di investimento. Se il contenuto d'acqua è basso, può essere usata per la realizzazione di laterizi o nella costruzione di dighe e argini.
- **Argilla/limo** - è a disposizione dopo un dragaggio di manutenzione in fiumi, canali, estuari e porti. Il contenuto d'acqua è di solito elevato, quindi risulta necessario un trattamento di dewatering che può durare mesi o anni a seconda delle modalità di drenaggio e che richiede inoltre una grande disponibilità di spazio per lo stoccaggio.
- **Miscela** - provengono da un lavoro di dragaggio di investimento e sono dovute ai processi di glaciazione, e comprendono roccia, sabbia, argilla e limo. Possono avere svariati usi come il riempimento ed il miglioramento dei terreni.

I criteri più importanti per far corrispondere il materiale all'uso che se ne vuole fare sono la composizione chimica e la granulometria di ciò che è stato scavato.

Devono essere soddisfatte le norme ambientali sia per un uso ingegneristico del materiale, sia per un uso ambientale ma questo non esclude categoricamente i sedimenti contaminati in quanto è considerato accettabile un certo livello di contaminazione, che dipende dal tipo di uso e dalle caratteristiche dell'ambiente in cui essi saranno sistemati.

Nella tabella 4.2 sono riportati gli aspetti qualitativi del materiale dragato che devono essere presi in considerazione a seconda della loro destinazione d'uso, ingegneristica o ambientale quindi, anche se le due categorie non sono così distinte in quanto possono esserci progetti che ricadono in entrambe le accezioni: la creazione di una superficie di barena può essere vista come una finalità ingegneristica ma dalla sua realizzazione deriva anche il miglioramento o la creazione di un habitat naturale.

4.3 Uso ingegneristico del materiale dragato

Sul seguito sono descritti gli usi di tipo ingegneristico che possono essere effettuati con il materiale dragato, tenendo in considerazione che, come evidenzia la tabella 4.3, esso dovrà essere scelto a seconda della destinazione d'uso.

4.3.1 Materiali da costruzione

L'escavazione di sabbia e ghiaia dal letto dei fiumi, dalle foci e dalle zone costiere per un utilizzo come aggregato nei materiali da costruzione è una pratica comune: in alcuni casi il materiale dragato può essere utilizzato direttamente con speciali tecniche di scavo e trasporto. Per un uso a terra invece sono spesso richiesti processi di separazione e di trattamento per ottenere calcestruzzo o altri materiali.

Ancora, il materiale dragato può essere impiegato come alternativa ad alcune risorse naturali utilizzate nell'industria delle costruzioni: roccia, sabbia, argilla, miscele varie possono diventare aggregati per il calcestruzzo, componenti per miscele bituminose, materie prime per il confezionamento di mattoni o di massi artificiali per la protezione delle coste (dighe a gettata).

Adeguate analisi devono confermare l'idoneità del materiale dragato al corrispondente uso nonchè attestare il soddisfacimento ai requisiti normativi. Occorre indagare quali siano le proprietà chimico-fisiche, ed i parametri più importanti da osservare sono il grado di umidità, la granulometria, il contenuto in materiale organico ed il tipo e concentrazione di inquinante.

4.3.2 Isolamento

Per prevenire la contaminazione dell'ambiente circostante, i sedimenti contaminati depositati sott'acqua possono essere ricoperti dal materiale dragato, il quale funziona da isolante contro l'azione della corrente, delle onde, delle navi. Questo strato di copertura impedisce al materiale inquinato di diffondersi nella colonna d'acqua salvaguardando così la qualità dell'acqua stessa.

L'argilla ed il limo argilloso, dopo essere stati privati dell'acqua, possono essere usati come rivestimenti artificiali nella sigillatura negli impianti di smaltimento confinati o nelle discariche. Il trattamento di dewatering può essere effettuato in bacini o siti appositi e dura circa un anno ma in alcuni casi, dato l'elevato contenuto di acqua o di contaminanti, sono necessari ulteriori trattamenti prima dell'utilizzo. Per migliorare le caratteristiche meccaniche possono essere aggiunti additivi consolidanti come CaO, ceneri volanti, limo, alluminati di calcio e minerali argillosi. Infine, negli impianti industriali dismessi, il terreno contaminato può essere ricoperto col materiale dragato (e successivamente drenato), per poter ristabilire nuove attività industriali.

4.3.3 Protezione dei litorali e dalle inondazioni

La protezione dei litorali dovuta a fenomeni di erosione è un'attività in crescita, a causa di una serie di operazioni dovute principalmente all'azione dell'uomo, come, ad esempio, l'aumento delle costruzioni marittime, il blocco della circolazione longshore dei sedimenti dovuto ai porti, la riduzione del trasporto solido nei fiumi, la naturale evoluzione delle foci dovuta all'innalzamento del livello del mare e l'arretramento delle coste. I seguenti usi del materiale dragato in questo campo sono degni di nota:

Tipo di uso	Proprietà del materiale dragato						
	Dimensione grani	Carbonio organico totale	Nutrienti	Detriti	Contaminanti organici	Contaminanti metallici	Contenuto salino
<i>Usi ingegneristici</i>							
Materiali da costruzione	•	•		•	•	•	•
Isolamento	•	•		•	•	•	
Protezione costiera e dalle inondazioni	•	•		•	•	•	
Miglioramento terreni	•	•	•	•	•	•	•
Sistemazione fluviale			•	•	•	•	•
<i>Miglioramento ambientale</i>							
Creazione di habitat	•	•	•	•	•	•	•
Miglioramento qualità dell'acqua	•	•	•	•	•	•	•
Acquacoltura	•	•	•	•	•	•	•
Attività di svago	•			•	•	•	•
Riposizionamento sostenibile	•		•	•	•	•	•
Agricoltura	•	•	•	•	•	•	•

Tabella 4.2: Proprietà rilevanti del terreno dragato in funzione della destinazione d'uso

Tipo di uso	Tipo di sedimento dragato				
	Roccia	Ghiaia	Sabbia	Argilla/limo	Miscela
Materiali da costruzione					
1 Sottofondo stradale	•	•	•	•	•
2 Riempimento	•	•	•	•	•
3 Dighe	•	•		•	
4 Terrapieni				•	•
5 Barriere frangivento				•	•
6 Bonifica		•		•	•
7 Paesaggistica			•	•	•
8 Consolidamento		•			•
9 Sigillature di CDF				•	
10 Copertura dei siti di discarica		•		•	•
11 Copertura di sedimenti contaminati		•		•	•
12 Riqualifica siti industriali dismessi				•	•

Tabella 4.3: Selezione del materiale dragato per usi ingegneristici



Figura 4.3: Volgermeerpolder, più grande sito di smaltimento dei rifiuti nei Paesi Bassi, Amsterdam

4.3.4 Sistemazioni di sponda

Specialmente in Olanda, la sistemazione delle sponde dei corsi d'acqua con l'utilizzo del materiale dragato è un'operazione abituale: esso, pulito o leggermente contaminato, può essere depositato sulle sponde o sugli argini rispettando alcune condizioni, come il fatto che la qualità del terreno in sito non deve peggiorare con l'applicazione del materiale apportato.



Figura 4.4: Utilizzazione del materiale dragato per la sistemazione di sponda

4.3.5 Ripascimenti

Come esaminato nel capitolo 1, la protezione dei litorali prevede di apportare artificialmente, tramite ripascimento, un dato volume di sabbia per fermare o ridurre l'arretramento della linea di riva causato dall'erosione della costa. L'impatto ambientale più rilevante è dovuto al fatto che vengono sommersi gli organismi che vivono in quella zona. I sedimenti fini contenuti nel materiale dragato vengono per primi portati via dalla corrente favorendo la formazione di torbidità nell'acqua prima di depositarsi sul fondo, lì dove la forza dell'onda è minore. Le normali draghe TSHD pompano direttamente la sabbia a riva tramite condotte. Per operazioni di dragaggio di piccoli porti, fatte solitamente con il sistema meccanico, trova un valido impiego il trasporto su chiatta. Lo scarico viene effettuato il più vicino possibile alla spiaggia con l'alta marea, dove l'azione delle onde trasporta il materiale e dà forma, infine, alla spiaggia. Per essere sicuri che la sabbia raggiunga



Figura 4.5: Ripascimento

effettivamente la spiaggia, le tramogge devono essere sempre vuotate ad una profondità inferiore alla cosiddetta *profondità di chiusura*, ossia all'interno della zona attiva del litorale.

La realizzazione di dune alle spalle della spiaggia fornisce poi un'ulteriore protezione e permette al ripascimento di durare più a lungo.

4.3.6 Costruzione di argini

Gli argini devono essere solidi a sufficienza per resistere alle azioni generate dalle onde, nel caso di costruzioni marittime, o per resistere alla corrente e al transito delle imbarcazioni, nel caso di arginature fluviali. Generalmente vengono impiegati riempimenti di ghiaia, roccia o argilla, i quali vengono preferiti alla sabbia.



Figura 4.6: Utilizzazione del materiale dragato per la realizzazione di un argine, Rostock (Germania)

4.3.7 Costruzione di barriere sommerse

Vengono realizzate con differenti tipi di materiale dragato, parallelamente alla costa, anche se l'orientazione dipende dagli scopi del progetto. Esistono tre diversi tipi di barriere sommerse:

- barriere fusibili: lo scopo è quello di provvedere al continuo deficit di sabbia della zona attiva del litorale causata dall'erosione della corrente e delle onde;
- barriere di protezione: progettate per assorbire parte dell'energia dell'onda. Questo migliora le caratteristiche ricreative della spiaggia e, inducendo il

frangimento dell'onda, può favorire l'attività del surfing. In alcuni casi la forma di queste barriere è tale da realizzare la rifrazione dell'onda, modificando le caratteristiche del locale trasporto solido;

- barriere di contenimento: usate per isolare una zona come un sito di deposito di materiale contaminato.

La granulometria adatta per la realizzazione delle barriere fusibili deve essere preferibilmente media o grossolana, ed esse vanno collocate in acque basse, dove le onde hanno un significativo effetto sul fondale, causando il trasporto dei sedimenti. Le barriere di protezione invece vengono poste a profondità maggiori, ma sempre in modo da avere il controllo sull'azione dell'onda. Quelle di contenimento sono adatte a quelle situazioni in cui la particolare conformazione del fondo permette di racchiudere un bacino od una cava, dove il materiale può essere depositato e dove la barriera funziona da diga per impedire al materiale contenuto di fuoriuscire.

Uno dei vantaggi di questo tipo di costruzione è la possibilità di impiegare draghe semoventi.

4.3.8 Realizzazione di barene

Il materiale dragato, solitamente caratterizzato da una granulometria fine, può essere impiegato per la realizzazione di barene nelle zone soggette a marea ed esposte ad erosione.



Figura 4.7: Superfici di barena nella laguna veneziana

4.4 Uso ambientale del materiale dragato

Per determinare l'idoneità del materiale dragato da utilizzare per miglioramenti ambientali, sono necessarie delle analisi chimico-fisiche, in modo tale da verificare che esso risponda ai requisiti legislativi. Occorre assicurare che il materiale non presenti rischi per la salute umana e per la qualità dell'acqua e che i siti proposti per l'intervento siano idonei.

I principali tipi di miglioramento ambientale realizzabili con il materiale dragato sono i seguenti:

- **Creazione e miglioramento di habitat** - in questo caso la qualità del materiale dragato deve essere valutata non solo sulla base dei requisiti relativi all'uso previsto (granulometria, carbonio organico totale, presenza di vari tipi di detriti) ma anche sulla base del contenuto di nutrienti, del livello di contaminazione, delle caratteristiche estetiche e tossicologiche. I potenziali

tipi di habitat che possono essere costruiti variano da paludi e zone umide a isole per la nidificazione degli uccelli, ambienti sottomarini, progetti di miglioramento dell'itticoltura, incremento della biodiversità, etc.

- **Miglioramento della qualità dell'acqua** - la realizzazione di zone umide specifiche per il trattamento del materiale organico, per la rimozione di batteri, per la mineralizzazione di contaminanti organici e per l'alterazione dei contaminanti metallici, è una tecnica che si è evoluta a partire dagli anni sessanta negli Stati Uniti. In Italia un esempio è l'area di fitodepurazione di Ca' di Mezzo, situata nel Comune di Codevigo, in provincia di Padova al confine con il Comune di Chioggia. Essa è stata realizzata artificialmente per il risanamento della Laguna di Venezia allo scopo di creare un sistema di fitodepurazione: un ecosistema palustre completamente ricostruito su terreni precedentemente utilizzati per fini agricoli.
- **Acquacoltura** - richiede materiali che possano essere usati per realizzare terrapieni che contengano acqua, piccoli bacini con fondo impermeabile e zone di trattamento dell'acqua.
- **Agricoltura** - il materiale dragato, specialmente il limo, può essere usato come strato superficiale per il miglioramento della struttura del terreno e per l'arricchimento in nutrienti dei terreni agricoli. L'esempio più evidente è il Nilo, che con le sue esondazioni depositava nei terreni circostanti il limo, che li fertilizzava. In questo ambito occorre prestare attenzione al contenuto salino, che può essere un problema per i raccolti.
- **Creazione di zone di svago** - questo comporta la creazione di servizi, come ad esempio sentieri attraverso zone naturali o altri habitat sensibili e l'accesso alle attività ricreative su corsi d'acqua.
- **Sistemazione sostenibile** - consiste nell'introduzione del materiale dragato nell'ambiente marino per mantenere o sopperire al deficit di sedimenti: questo può essere ottenuto o decidendo deliberatamente di far cadere il materiale in eccesso durante l'operazione di carico del materiale dragato o posizionando quest'ultimo sul fondale. In ogni caso i sedimenti vengono movimentati dai normali processi idrodinamici presenti nella zona.
- **Riempimenti** - le depressioni artificiali nei corsi d'acqua e nelle foci o nei sistemi marini sono depositi ideali per disporre il materiale dragato in quanto l'ambiente può tornare ad una forma topografica simile a quella originaria.

4.5 Metodi di dragaggio e di deposito collegati all'uso

In aggiunta alla considerazione di come raggiungere al meglio gli obiettivi del progetto di dragaggio, bisognerebbe contemplare l'uso previsto del materiale nella scelta della migliore tecnica di dragaggio e di deposito; in questo modo esso diventa parte integrante della strategia organizzativa dell'intero progetto.

Se i sedimenti non corrispondono direttamente ai criteri dell'utilizzazione, saranno necessari dei processi di trattamento e, in questo caso, bisognerà collegare il processo di dragaggio con quello di utilizzo tramite una fase intermedia di deposito.

La necessità del trattamento e la tipologia idonea possono avere conseguenze sui metodi di dragaggio e di deposito usati. La figura 4.8 schematizza le operazioni

che dal dragaggio portano all'utilizzo del materiale: esso può essere impiegato direttamente senza alcuna fase intermedia (*Direct use*) o indirettamente, in quanto sono previsti trattamenti intermedi (*Indirect use*). Ogni tipologia di uso deve rispondere a caratteristiche dei sedimenti e della qualità dell'acqua certe.

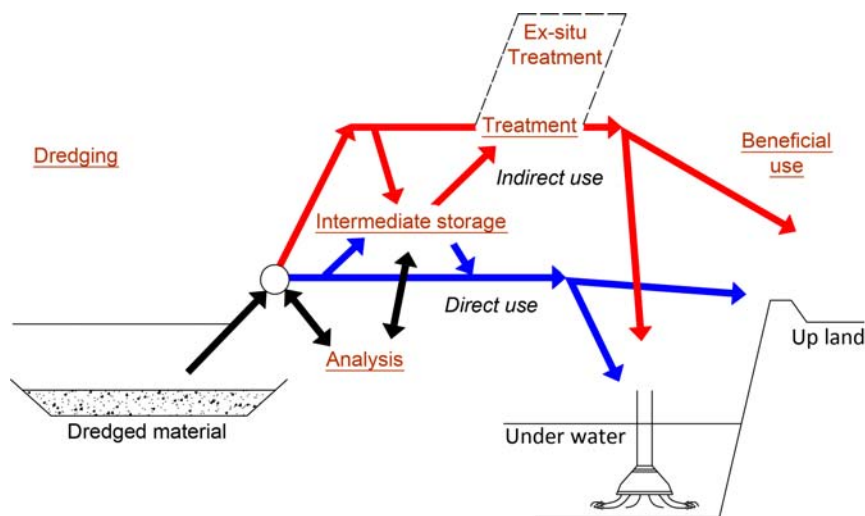


Figura 4.8: Il ciclo di sequenze dal dragaggio all'uso

I criteri di scelta per il percorso più adatto da seguire possono essere così suddivisi:

- qualità ambientale: i parametri da valutare sono chimici e biologici. Questi criteri sono validi sia per un utilizzo ingegneristico del materiale, che ambientale;
- qualità geotecnica: comprendono parametri fisici come la granulometria, la permeabilità, le caratteristiche meccaniche, etc.

Uso diretto

Il dragaggio di investimento realizzato tramite draghe aspiranti con disgregatore, con draghe a secchie, a cucchiaio o a benna mordente, produce volumi di materiale consolidato, caratterizzato da roccia, sabbia e argilla. Esso può essere pompato tramite una condotta galleggiante alla zona di riutilizzo oppure può essere trasportato da chiatte nell'area stabilita. I principali impieghi sono la realizzazione di argini, bonifica, barriere offshore e barriere sommerse.

Il dragaggio di manutenzione fatto con draghe aspiranti mette a disposizione materiale come ghiaia sciolta, sabbia e fango; esso viene trasportato dalla draga nella zona d'uso ma può anche essere depositato sulla stiva della nave tramite i boccaporti per poi essere pompato attraverso una condotta galleggiante o pompato a gettata.

Fase di trattamento

Per il materiale dragato che non risponde ai criteri di utilizzo, sono stati sviluppati numerosi tipi di trattamento. Le tecniche fisiche, come il dewatering e la separazione, servono a soddisfare requisiti di tipo geotecnico, mentre le tecniche chimiche, biologiche o termiche servono a soddisfare requisiti di tipo ambientale.

Qualora invece i requisiti imposti siano molteplici, sarà necessaria una combinazione di più tecniche, dove la prima fase è sempre quella di dewatering, il

che suggerisce di utilizzare nelle operazioni di dragaggio, sistemi che limitino il contenuto d'acqua nel materiale.

Deposito intermedio

Per motivi logistici può risultare necessario depositare temporaneamente il materiale; nell'*uso diretto* questo deriva in primo luogo dal fatto che i tempi di dragaggio e uso non coincidono a causa di questioni ambientali e di pianificazione e poi dalla differenza tra il tasso di produzione del dragaggio e il tasso di richiesta d'uso.

Nel *percorso di trattamento* invece, il deposito intermedio può essere richiesto per una serie di motivi, quali:

- la differenza tra la capacità del dragaggio e quella del trattamento, che generalmente è un ordine di grandezza più bassa rispetto alla prima;
- creare omogeneità nell'ingresso del materiale dragato: certi trattamenti, come la separazione meccanica richiedono afflussi omogenei per la riuscita dell'operazione.

4.5.1 Metodi specifici per l'utilizzo del materiale dragato

Metodi di dragaggio

Con le draghe a strascico con testa aspirante può essere fatta una preliminare separazione granulometrica già durante la fase di dragaggio. Se viene dragata una miscela di materiale grossolano (sabbia e ghiaia) e fine, una grossa porzione di quest'ultimo può essere eliminata tramite overflow: questo può risultare utile per ottenere sabbia fine da una miscela eliminando ad esempio i limi, il che è richiesto per scopi di ripascimento o produzione di materiali da costruzione. C'è da tenere presente che l'overflow produce un considerevole aumento di torbidità nella colonna d'acqua, comportando un'ulteriore problema nella zona del dragaggio.

Anche il dragaggio selettivo può essere utilizzato per estrarre del materiale con caratteristiche date, dopo averlo localizzato con indagini geotecniche.

Metodi di deposito

Specifici metodi di deposito vengono adottati a seconda del tipo di utilizzo del materiale, come, ad esempio:

- deposito tramite diffusori, dispositivi installati al termine di una condotta di scarico per ridurre la velocità di efflusso e quindi la sospensione dei sedimenti; questa tecnica dà la possibilità di coprire un'area con uno strato omogeneo di materiale;
- deposito tramite pompaggio a gettata (*rainbow system*), scelto quando l'accessibilità al luogo di scarico è limitata;
- deposito sul fondale, eseguito tramite condotta o diffusore quando occorre ridurre la torbidità.

Incidenza sulla logistica

Fondamentale nella messa a punto di un ciclo sostenibile ed ecocompatibile per considerare il materiale dragato come una risorsa, è che il dragaggio e l'utilizzo del materiale combacino: la chiave per il successo del progetto è una buona conoscenza di entrambi i processi. A tal riguardo, alcune voci devono essere valutate in ambito logistico:

- **sincronia:** significa che entrambe le operazioni, dragaggio e utilizzo, sono pianificate e organizzate nello stesso momento; se non è possibile occorre valutare la possibilità di un deposito temporaneo;
- **scelta della tecnica di dragaggio e deposito:** è conseguenza di fattori come fattibilità tecnica, condizioni economiche e ambientali;
- **caratteristiche dei sedimenti:** essi devono essere ben analizzati in fase preliminare in relazione al tipo di utilizzo del materiale;
- **aspetti operativi:** comprendono tasso di produzione, tempi di consegna, etc.
- **condizioni al contorno nella zona di utilizzo:** possono esserci interferenze con le attività locali come la pesca o la navigazione ma anche occorre valutare i requisiti ambientali del materiale dragato che verrà utilizzato;
- **accordi contrattuali:** quando le varie operazioni di dragaggio, trattamento e riutilizzo sono effettuate da soggetti diversi occorre ci sia coordinamento in modo tale che i criteri per l'utilizzo siano soddisfatti.

4.6 Analisi di costi e benefici

Tradizionalmente, i costi per l'utilizzo del materiale dragato sono stati valutati solo in termini economici, al contrario dei costi del deposito. Per classificarli completamente è necessario considerare tutti i costi e i benefici per la società, sia nel breve che nel lungo periodo. Per assistere nel processo decisivo è stato proposto uno strumento di analisi dei costi; se si tiene conto di tutti gli effetti per la società, esso viene definito in *analisi costi-benefici sociali*. La sequenza delle operazioni è la seguente:

1. analisi del problema e definizione delle possibilità;
2. identificazione degli effetti delle alternative;
3. analisi degli sviluppi esogeni rilevanti e analisi di sensibilità;
4. valutazione degli effetti in termini di costi e benefici delle varie possibilità;
5. analisi e classifica delle possibilità in relazione al rapporto costo/beneficio.

Sono necessarie una scrupolosa conoscenza del sistema di analisi e un'informazione dettagliata sulle specifiche voci di costo e di beneficio, che evidentemente sono sito-specifiche.

4.6.1 Costi

Nell'ambito nell'utilizzo del materiale dragato possono essere richieste attrezzature tecniche e procedure diverse da quelle impiegate nelle normali operazioni di deposito e questa è una voce che influenza i costi: ad esempio, per limitare il contenuto d'acqua nel materiale può essere conveniente scegliere draghe a sistema meccanico anziché draghe idrauliche semoventi ad aspirazione. Anche il tasso di trattamento del materiale dragato può limitare il tasso di produzione del dragaggio, comportando il bisogno di uno stoccaggio temporaneo. Altre voci di costo rilevanti sono la distanza tra il sito di dragaggio e l'area di deposito e l'accessibilità per il trasporto.

Il trattamento del materiale dragato non è sempre richiesto per il suo deposito: esso viene sottoposto a dewatering per essere utilizzato a terra, specialmente se contaminato.

Tecnologie come la dissabbiatura e la maturazione sono generalmente meno costose rispetto al deposito, mentre i costi per il consolidamento ed i trattamenti termici sono più elevati. I costi dipendono molto dalle condizioni specifiche del sito, come le caratteristiche del materiale dragato, la quantità dei sedimenti, la capacità di un'area di deposito, il tasso di produzione delle strutture di trattamento e di trasporto, ma anche dal tipo di utilizzo del materiale.

I ricavi dei prodotti e dei costi/benefici per la società non sono sempre stati presi in considerazione: ad esempio, il degrado di un'area di deposito a terra può avere un costo ambientale che non viene generalmente considerato. Tale spazio è di solito più importante per la società che senza il deposito, anche se in ultima analisi, la discarica stessa può avere un utilizzo finale molto prezioso.

Altri costi comprendono:

- la preparazione del sito con misure di isolamento, strutture di contenimento, rimozione della vegetazione;
- ulteriori analisi del materiale dragato sia in sito che fuori per caratterizzarne adeguatamente le proprietà chimico-fisiche in modo da verificare l'idoneità per l'utilizzo e/o per il trattamento. Sono necessarie anche per le valutazioni sull'impatto ambientale.

Nel caso in cui venga impiegato materiale contaminato, è necessario un processo di monitoraggio degli effetti ambientali in modo da prendere al momento giusto le dovute misure correttive: può essere necessario rifiorire il materiale eroso dalle barriere offshore o la vegetazione nelle aree naturalistiche di sviluppo.

Anche gli effetti a lungo termine devono essere presi in considerazione, questo comprende la valutazione del ciclo di vita dei prodotti, che include cambiamenti nella mobilità degli inquinanti con il tempo e la possibilità di ulteriore utilizzo dopo il deposito. Questo aspetto è rilevante specialmente per il materiale dragato nel quale i contaminanti sono immobilizzati con l'aggiunta di cemento.

Nel ciclo di sequenze dragaggio-utilizzo, alcuni tra i principali rischi finanziari sono:

- trovare qualità di materiale diverse da quelle individuate dalle analisi in sito;
- insufficiente resa delle tecniche di trattamento per soddisfare i diversi criteri;
- insuccesso nel trovare i requisiti per l'utilizzo;
- non idoneità del sito di utilizzo;

- responsabilità per non aver soddisfatto i requisiti ambientali.

Questi rischi devono essere assegnati o alle autorità competenti o al contraente. Nel capitolo 8, viene proposta un'analisi dei costi delle varie attrezzature di dragaggio, assieme ad una stima dei tassi di produzione.

4.6.2 Benefici

Un beneficio immediato derivante dall'uso del materiale dragato è il risparmio della capacità dei siti di deposito in modo tale da non doverne cercare o realizzare di nuovi; questa capacità 'risparmiata', può essere riservata al materiale che non può essere utilizzato. Dove poi il materiale dragato sostituisce delle risorse primarie, il valore di quest'ultime può essere visto come un beneficio.

In molti paesi risorse come sabbia e ghiaia ed altri materiali da costruzione sono disbonibili in grande quantità, quindi per poter competere, i prodotti ottenuti dal materiale dragato devono essere abbastanza più economici, garantendo la stessa qualità.

I prodotti di alta qualità derivanti sempre dal dragaggio hanno un valore maggiore ma sono anche più costosi da produrre e richiedono un maggiore dispendio di energia: i mattoni ottenuti con materiale dragato, ad esempio, devono essere venduti ad un prezzo inferiore rispetto a quelli normali (solitamente il 10% in meno) perchè il marchio *ottenuto da materiale di rifiuto* rende i compratori piuttosto riluttanti ad acquistarli.

I benefici derivanti dai miglioramenti ambientali sono difficili da esprimere in termini monetari; una possibilità è quella di stimare il valore standard in €/ha sulla base di alcuni tipi di aree naturalistiche note oppure si può condurre un sondaggio su quanto la gente sia disposta a pagare per un ambiente naturale.

Questi approcci mostrano ovviamente carenze e non sono accettati nei più complessi modelli economici, comunque, l'utilizzo del materiale dragato negli impieghi precedentemente esposti, comporta dei benefici per la società in termini di miglioramento ambientale, che sono riconosciuti ed approvati, (100 2009).

Capitolo 5

Dragaggio ambientale

5.1 Inquadramento

Negli ultimi decenni la coscienza ambientale ha iniziato a farsi sentire anche nel campo dei dragaggi: per limitare gli effetti negativi delle operazioni di scavo, sono state messe a punto delle procedure, dette a *basso impatto*, che si basano sui concetti di selettività, precisione di posizionamento e taglio, minimizzazione della torbidità e delle perdite, ottimizzazione della concentrazione del materiale dragato.

In particolare, per quanto riguarda la selettività, nel dragaggio ambientale non tutto il materiale da dragare riveste la stessa importanza, ovvero ha lo stesso grado di contaminazione e gli stessi inquinanti, per cui è necessario selezionare e distinguere i materiali puliti da quelli inquinati, soprattutto perchè il costo dello stoccaggio e trattamento degli ultimi è fino a cento volte superiore a quello dei primi.

Inoltre, i siti di discarica nei quali depositare il materiale dragato inquinato sono pochi e di capacità limitata, per cui è necessario scavare non solo il meno possibile, ma anche aggiungere nel processo di dragaggio un quantitativo di acqua estremamente basso, altrimenti diventerebbe essa stessa inquinata, e quindi un ulteriore peso e volume da trattare.

In questo senso la selettività costituisce il principio di economia fondamentale: essere in grado di scavare separatamente diversi tipi di materiali con diversi gradi di inquinamento e non, contenenti contaminanti di particolare gravità.

Più in generale, una qualsiasi attività di rimozione dei sedimenti richiede l'effettuazione di un dragaggio accettabile e sicuro dal punto di vista ambientale, (Palermo, Schroeder *et al.* 2008)

5.2 Obiettivi e processi

Gli obiettivi di un'operazione di dragaggio ambientale in genere comprendono:

1. dragare con sufficiente precisione, tale che i sedimenti contaminati siano rimossi e i livelli di pulizia dei sedimenti siano ottenuti senza rimozione eccessiva di materiale pulito;
2. dragare i sedimenti in un ragionevole periodo di tempo e in una condizione compatibile con il successivo trasporto per il trattamento o lo smaltimento;

3. ridurre e/o controllare la risospensione dei sedimenti contaminati, il trasporto a valle dei sedimenti rimessi in sospensione e le emissioni di contaminanti di interesse (COCs) per l'acqua e l'aria;
4. dragare i sedimenti in modo tale che la generazione di residui sia ridotta e/o controllata.

Un certo numero di fattori e di processi deve essere adeguatamente considerato e valutato per garantire che l'operazione di dragaggio ambientale raggiunga gli obiettivi di cui sopra, così come gli obiettivi del rimedio. La figura 5.1 è un'illustrazione concettuale di un dragaggio ambientale e dei relativi processi. Questi

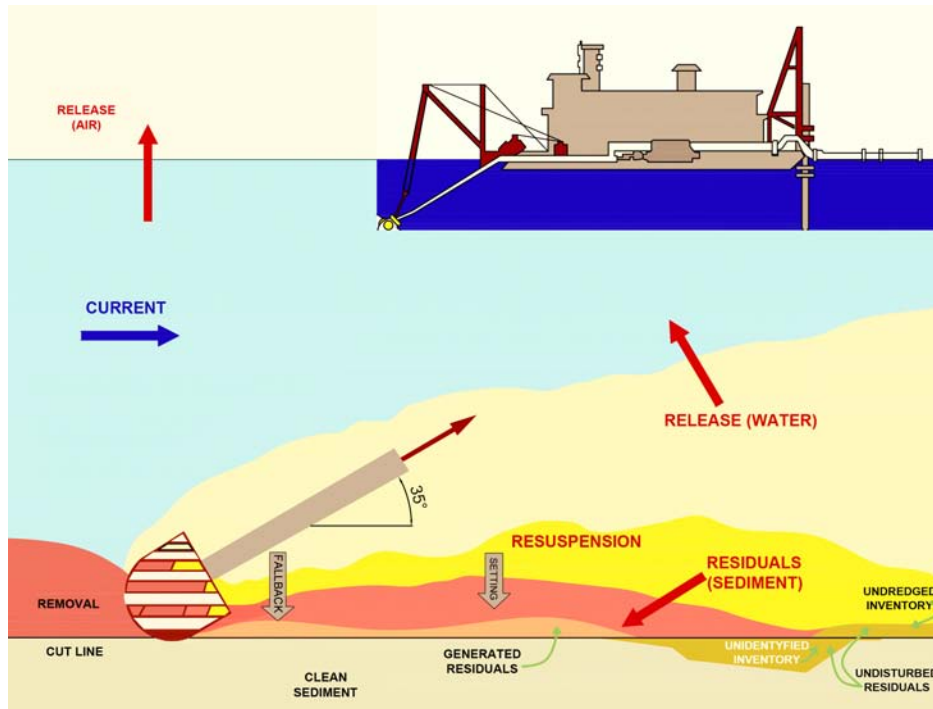


Figura 5.1: Schematizzazione di dragaggio ambientale e relativi processi

processi sono definiti come segue:

- **rimozione** - è il processo mediante il quale i sedimenti vengono rimossi dal fondo e sollevati o trasportati fuori dalla linea di taglio della draga. Il dragaggio permette di rimuovere i sedimenti in modo meccanico e/o pneumatico, tramite penetrazione, per scavo, rastrellamento, taglio, o aspirazione idraulica del fondo. Una volta rimosso, il sedimento viene sollevato dalla draga tagliare o idraulicamente attraverso un tubo o meccanicamente;
- **risospensione** - è il processo mediante il quale i sedimenti rimossi vengono dispersi nella colonna d'acqua a causa dell'operazione di dragaggio; le particelle risospese possono stabilirsi nella zona di dragaggio o essere trasportate a valle;
- **diffusione** - è il processo per cui i risultati dell'operazione di dragaggio comportano la perdita di contaminanti dall'acqua dei pori dei sedimenti o dei contaminanti assorbiti dal sedimento stesso, risospeso nella colonna d'acqua o nell'aria. I contaminanti disciolti e colloidali che vengono rilasciati nella colonna d'acqua, vengono trasportati più a valle rispetto a quelli assorbiti dai sedimenti risospesi;

- **residui** - sono sedimenti contaminati rimasti nelle vicinanze della zona di dragaggio dopo il completamento delle operazioni. Essi possono essere generalmente raggruppati in due categorie: residui inalterati e residui generati. I primi sono sedimenti contaminati presenti sul fondo che sono stati scoperti dal dragaggio ma non completamente rimossi; questi, possono essere stati identificati durante la caratterizzazione ed essere situati sotto la linea di taglio o possono risultare da imprecisioni nel dragaggio. I secondi invece sono definiti come sedimenti staccati, ma non rimossi, che ricadono ad esempio per versamento, stabilendosi nella zona di dragaggio e formando un nuovo strato. Il livello di preoccupazione associata ai residui dipende sia dalla concentrazione della contaminazione che dalla densità e spessore del strato contaminato superficiale.

5.3 Strategie di gestione

I quadri internazionali e nazionali di gestione del materiale dragato mirano ad assicurare che tutte le possibilità relative alla fattibilità ambientale e all'attuabilità tecnica e socio-economica, siano adeguatamente valutate. L'attenzione qui va posta sul processo decisionale che deve valutare il contesto ambientale ed identificare le necessarie misure di controllo per ridurre gli effetti dannosi (potenziali) ad un livello accettabile, (Csuti e Burt 1999).

Questa strategia di gestione può essere applicata a qualsiasi tipo di materiale dragato, sia esso inquinato o meno e riflette lo stato attuale della conoscenza scientifica e tecnologica, nonché l'esperienza acquisita.

Le fasi principali di questa procedura sono descritte sul seguito.

Fase 1 - Stabilire la necessità del dragaggio. In alcuni casi esso può essere evitato o può essere ridotto il volume di materiale da dragare sulla base di attente considerazioni: alternative al dragaggio possono essere la bonifica di fondali contaminati, o l'isolamento in sito degli inquinanti.

Fase 2 - Caratterizzare il materiale dragato. Sono da raccogliere e valutare informazioni e dati circa le caratteristiche fisiche, chimiche, biologiche e geotecniche del materiale da dragare. Il tipo di analisi e il grado di dettaglio richiesto dipendono dall'uso che verrà fatto del materiale e dalle possibilità di scarica; esso varia notevolmente da caso a caso. In questa fase dovrebbero essere identificati, se presenti, i contaminanti di interesse.

Fase 3 - Valutazione dei possibili *utilizzi vantaggiosi*. Ciò include le seguenti attività:

- valutazione dell'idoneità fisica/geotecnica del materiale;
- valutazione della fattibilità operativa;
- valutazione di impatto ambientale;
- valutazione dei costi.

Fase 4 - Selezionare preliminarmente le potenziali alternative di smaltimento. I criteri di selezione, dopo aver identificato le alternative in modo da ridurle, sono specifici per ogni progetto e possono includere: condizioni idrologiche e geologiche, caratteristiche del paesaggio, caratteristiche culturali e storiche, utilizzi legittimati attuali o previsti (pesca, turismo, navigazione, estrazione), distanza dalla zona di dragaggio, costi.

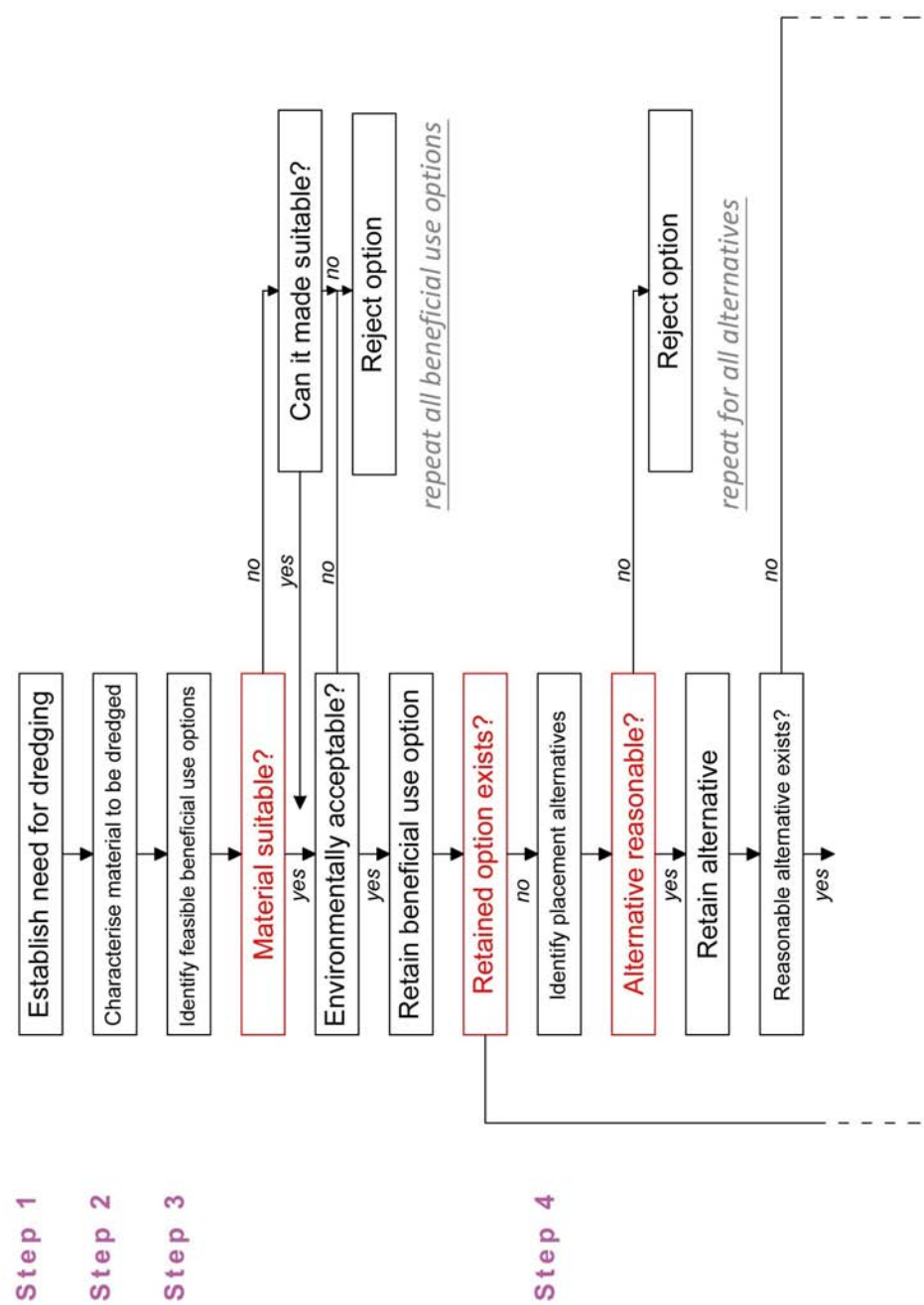


Figura 5.2: Diagramma di flusso per la strategia organizzativa, I

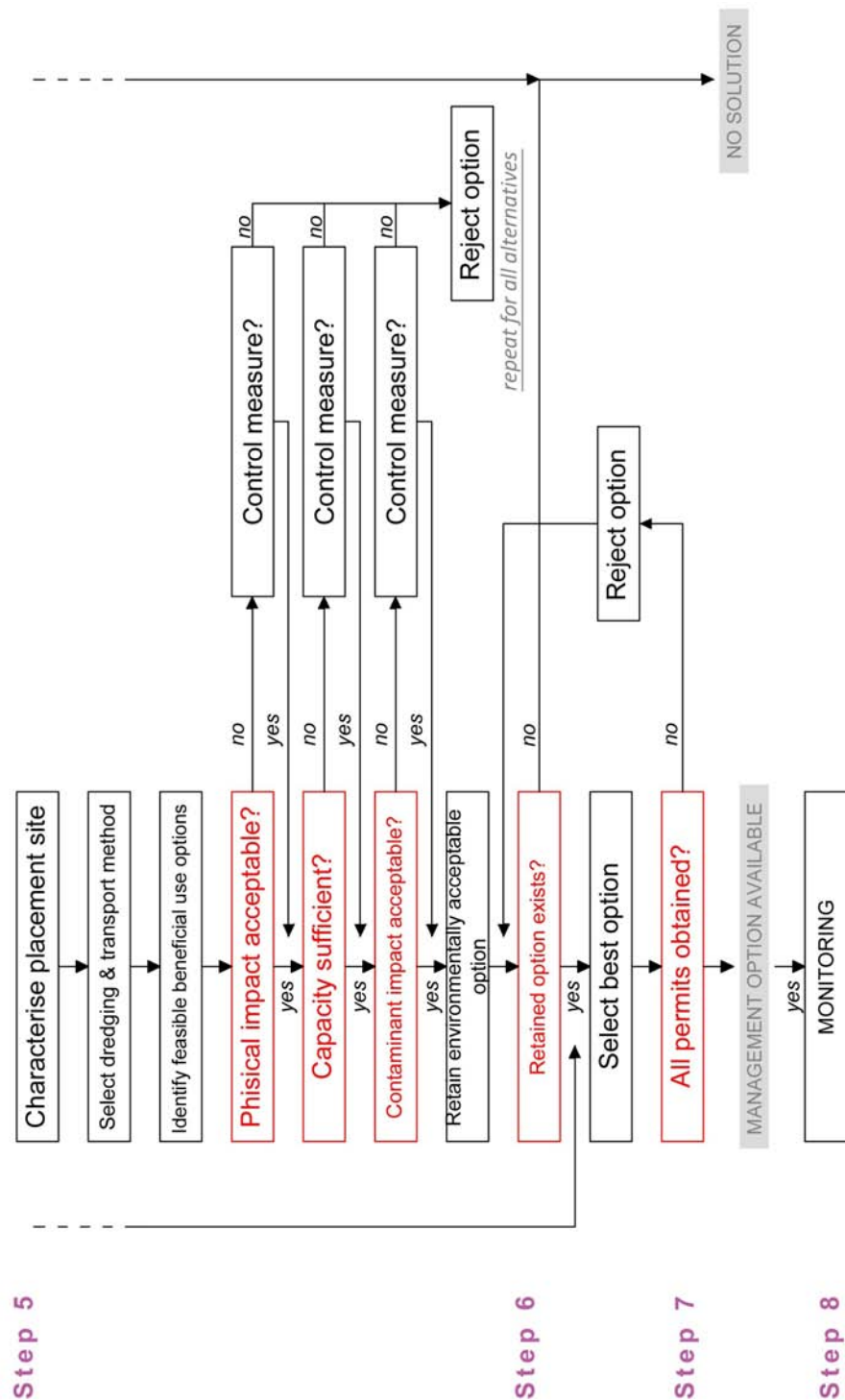


Figura 5.3: Diagramma di flusso per la strategia organizzativa, II

Fase 5 - Valutare in modo dettagliato le potenziali alternative di smaltimento. Questo viene fatto in modo da determinare, sulla base di ragionevoli assunzioni conservative, la scala temporale, spaziale e naturale degli impatti previsti. In sostanza dovrebbe risultare un preciso rapporto delle conseguenze relative allo smaltimento/discarica. Questa fase include i seguenti livelli:

- descrizione dettagliata dei siti di smaltimento previsti;
- selezione di metodi di dragaggio e trasporto compatibili per ogni sito previsto;
- valutazione della capacità del sito e degli impatti fisici (diretti e potenziali);
- valutazione dell'impatto dei contaminanti.

Fase 6 - Valutare la progettazione definitiva e la realizzazione. La selezione finale è basata sul bilancio di un ampio insieme di fattori specifici per ogni caso, che possono includere: aspetti ambientali aggiuntivi, disponibilità e fattibilità, costi, sicurezza, opinione pubblica, etc.

Fase 7 - Ottenere l'approvazione per i lavori. Bisogna essere in possesso di tutti i permessi necessari, che possono essere pubblicati per revisione. Un primo coinvolgimento di tutte le parti interessate nel processo di valutazione può tornare utile anche per le fasi successive. Se non è possibile ottenere tutte le necessarie autorizzazioni, occorre rivalutare i requisiti del progetto e i criteri di decisione finché non si giunge ad una soluzione.

Fase 8 - Elaborare il programma di monitoraggio. Il monitoraggio delle operazioni di discarica e dei loro effetti a lungo termine è una parte integrante del processo decisionale ed è una condizione di garanzia per le autorizzazioni necessarie. Esso viene effettuato prima, durante e dopo la discarica. I risultati possono evidenziare la necessità di modificare il progetto originale.

5.4 Valutazioni iniziali

Questa sezione fornisce informazioni sullo svolgimento delle valutazioni iniziali per un dragaggio ambientale come componente di rimedio per un sito contaminato. Tali valutazioni dovrebbero includere quanto segue:

- confrontare le condizioni del sito e le caratteristiche dei sedimenti noti a quelli che richiedono un dragaggio;
- prendere in considerazione vantaggi e svantaggi del dragaggio rispetto ad altri approcci;
- considerare il dragaggio ambientale come componente di un completo ciclo di dragaggio e trattamento/smaltimento;
- identificare i requisiti di progetto significativi e i vincoli che possono validare l'efficacia del dragaggio ambientale;
- determinare la fattibilità di dragaggio.

Ulteriori dettagli su ognuno di questi aspetti sono descritti sul seguito.

5.4.1 Aspetti che favoriscono il dragaggio

Per la valutazione di un dragaggio ambientale come rimedio, occorre in primo luogo raccogliere tutte le informazioni disponibili sul sito e confrontarle con quelle teoriche, favorevoli a tale operazione e successivo trattamento/smaltimento. Queste considerazioni sono importanti nel determinare la fattibilità del dragaggio a livello concettuale, e nel decidere se una valutazione più dettagliata è necessaria. Esse possono essere sintetizzate come segue:

- il sito di discarica è nelle vicinanze;
- è disponibile una zona adatta per la movimentazione del materiale dragato;
- il litorale adiacente e le infrastrutture sono in grado di ospitare il dragaggio e lo scavo, la manovrabilità e l'accesso non sono impediti da pilastri, piloni o altre strutture;
- le modalità di navigazione sono previste o in programma;
- il tirante d'acqua è sufficiente per il pescaggio delle draghe;
- la riduzione del rischio di rimozione dei sedimenti a lungo termine è maggiore rispetto alla perturbazione dell'habitat;
- la velocità della corrente è bassa, la risospensione ed il trasporto a valle durante dragaggio sono ridotti;
- i sedimenti contaminati ricoprono quelli puliti;
- i sedimenti contengono pochi detriti (tronchi, massi, rottami);
- i contaminanti sono correlati con la dimensione dei grani dei sedimenti (questo facilita la separazione e riduce al minimo i costi di smaltimento).

5.4.2 Vantaggi e limiti del dragaggio ambientale

Se l'operazione raggiunge adeguati livelli di pulizia per il sito, questo comporta la validità circa l'efficacia a lungo termine del metodo, con particolare attenzione per l'esposizione futura della zona alle contaminazioni. La rimozione di sedimenti contaminati può minimizzare l'incertezza associata alle previsioni sui sedimenti del fondale e alla probabilità relativa all'esposizione futura.

La rimozione del materiale contaminato fornisce flessibilità per utilizzi futuri del corpo idrico. Nei metodi di pulizia in situ, come il ripristino naturale e la copertura, spesso c'è bisogno di controlli istituzionali che limitino l'utilizzo del corpo idrico. Anche se i rimedi nei siti con contaminanti richiedono solitamente la notifica di avvisi riguardo al consumo di pesce per un certo periodo dopo la rimozione, potrebbero essere necessari altri tipi di controlli istituzionali al fine di proteggere uno strato di sedimentazione naturale. Se i residui di dragaggio sono bassi, la rimozione dei sedimenti può ridurre il rischio in modo rapido e realizzare azioni correttive più velocemente di quanto non si otterrebbe con un ripristino naturale.

Per quanto riguarda i limiti relativi alla rimozione dei sedimenti occorre sottolineare che l'attuazione è di solito più complessa e costosa rispetto alla copertura in situ, a causa delle tecnologie di rimozione stesse, della necessità di trasporto, stadiamento, trattamento e smaltimento dei sedimenti dragati. Le tecnologie di trattamento per i sedimenti contaminati spesso offrono problemi di

implementazione a causa della limitata esperienza su larga scala e del costo elevato. In alcune zone, la capacità di smaltimento può essere limitata e risulta difficile individuare nuovi impianti di smaltimento locali. Il dragaggio o lo scavo possono essere anche più complessi e costosi di altri approcci a causa della maneggevolezza e portabilità delle attrezzature. L'operatività e l'efficacia possono essere influenzate da altre infrastrutture, di superficie e sommerse (moli, ponti, banchine, paratie, o palificazioni), restrizioni ambientali, e larghezza dei canali.

Vi è poi un'incertezza associata alla valutazione circa l'estensione di contaminazione residua dopo la rimozione; essa può essere maggiore in presenza di ciottoli, massi, o detriti, in ambienti ad alta energia, a profondità maggiori, e dove i sedimenti contaminati ricoprono direttamente la roccia. I residui possono anche essere maggiori in acque basse. Questi fattori problematici possono rendere difficili e costosi il processo di rimozione dei sedimenti e la realizzazione di bonifiche.

Un altro limite viene dalla probabilità di significative perdite di contaminanti per risospensione, provocata nella colonna d'acqua sia da particelle sciolte che da sostanze associate ai contaminanti. Il materiale risospeso poi può essere ridepositato nel sito di dragaggio o trasportato più a valle.

Per quanto riguarda la copertura in sito, è inevitabile la distruzione dell'ambiente bentonico durante il dragaggio o lo scavo e comprende di solito la distruzione temporanea della comunità acquatica e dell'habitat all'interno dell'area di bonifica.

Infine, la rimozione dei sedimenti in prossimità di strutture litoranee come barriere di protezione, muri di sostegno, banchine, ha il potenziale di indebolire il litorale e/o strutture, creando instabilità nelle fondamenta.

5.4.3 Dragaggio ambientale, componente del ciclo di rimozione dei sedimenti

Una delle considerazioni più importanti legate al dragaggio ambientale è che, una volta rimossi i sedimenti contaminati dal corpo idrico, qualcosa deve essere fatto con quel materiale.

Il dragaggio ambientale deve essere visto come una componente di un più ampio intervento di rimedio. Il processo di dragaggio ambientale deve essere completamente integrato e compatibile con altre componenti come il trasporto dei sedimenti dragati ed il loro successivo trattamento e/o smaltimento o riutilizzo. Inoltre può essere una componente di un rimedio combinato che coinvolge altre azioni all'interno del corpo idrico stesso: ad esempio, serve per assicurare la necessaria profondità di navigazione o per rimuovere materiale molto contaminato, congiuntamente all'operazione di copertura (*capping*) o MNR ¹, per raggiungere il livello di pulizia finale.

Un rimedio che coinvolge il dragaggio deve comprendere un numero di componenti che formano una serie di processi, quali: la rimozione, tramite dragaggio ambientale, il trasporto e lo stoccaggio, il trattamento e lo smaltimento. La figura 5.4 mostra un esempio di diagramma di flusso che evidenzia le possibili fasi di un dragaggio. La disponibilità di un'adeguata capacità di smaltimento in loco è una considerazione importante nello sviluppo di tale serie di processi. Il dragaggio più semplice o i progetti di scavo possono essere costituiti da un minimo di tre componenti, mentre progetti più complessi possono includere tutte o quasi tutte

¹monitored natural recovery - un tipo rimedio che prevede di lasciare i sedimenti contaminati in sito per consentire processi fisici, chimici e biologici in corso in modo tale da ridurre l'esposizione all'inquinamento attraverso l'isolamento fisico; non è un processo passivo, in quanto incorpora un ampio monitoraggio per documentare le prestazioni dei processi di recupero naturali

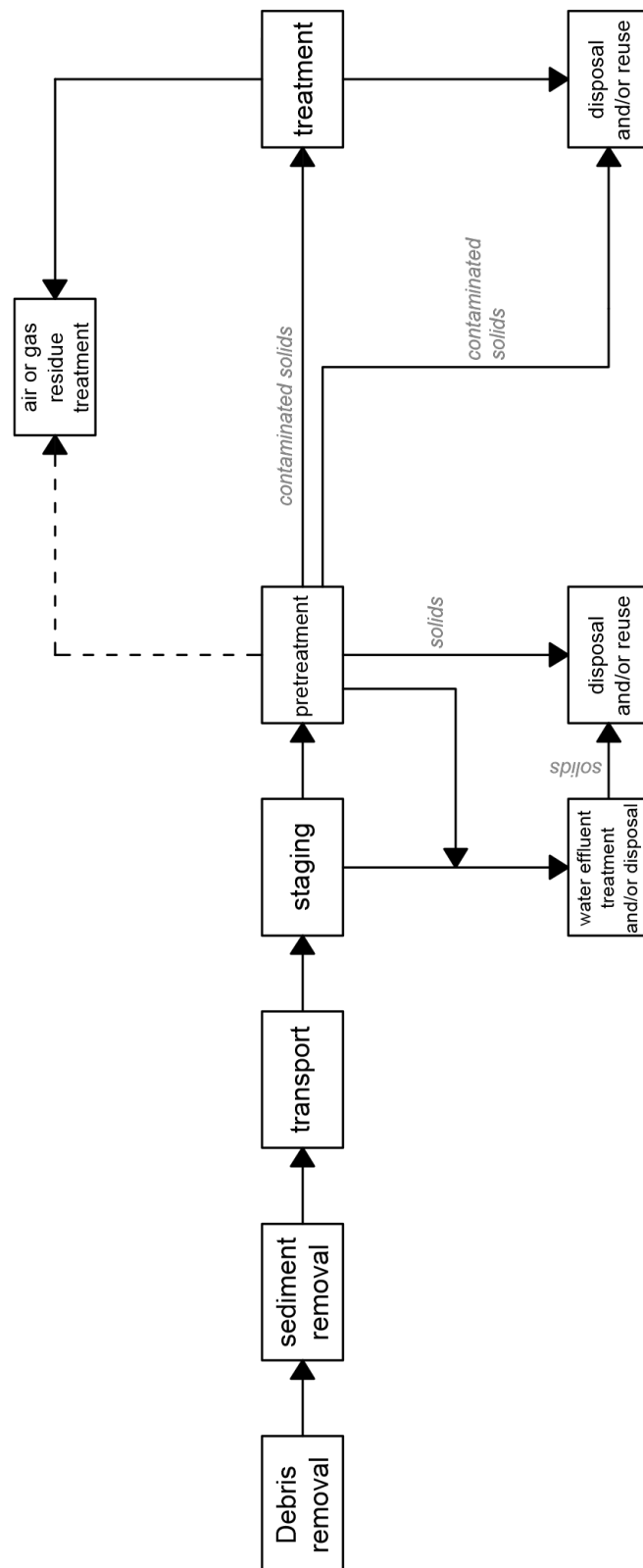


Figura 5.4: Esempio di diagramma di flusso per le fasi in un dragaggio

le componenti. Un coordinamento efficace di ogni componente è molto importante per ottimizzare il rapporto costo-efficacia in tempi rapidi.

Il dragaggio, come fase all'interno di una sequenza, deve essere compatibile con le fasi successive all'operazione di rimozione: i principali fattori nella scelta delle attrezzature di dragaggio compatibili saranno il trattamento e lo smaltimento, le dimensioni e la capacità dei siti di smaltimento, la distanza dal sito di dragaggio a quello di trattamento.

5.4.4 Studi pilota

Sono stati condotti degli studi pilota sul campo in alcuni siti contaminati per sviluppare dati sulle prestazioni delle varie apparecchiature di dragaggio, misure di controllo e strumenti di monitoraggio. Questi devono essere considerati quando è necessaria una serie di dati di monitoraggio per un intervento su larga scala, con scopo di determinarne la fattibilità o per confermare le ipotesi di progetto. L'obiettivo principale di qualsiasi studio pilota è quello di ridurre le incertezze riguardo l'efficacia del dragaggio. Ragioni specifiche per prendere in considerazione uno studio pilota possono includere:

- sviluppare e sperimentare l'adeguatezza degli strumenti;
- valutare la fattibilità di un pezzo di equipaggiamento o di una tecnica su larga scala;
- stabilire se la strategia di campionamento e le tecniche sono efficaci;
- sviluppare le informazioni specifiche del sito sui residui previsti, sulla sospensione e liberazione, e sui limiti relativi alla realizzazione che possono influenzare il progetto, la pianificazione e i costi;
- valutare la probabilità di successo dei vari approcci;
- identificare i problemi logistici che si possono verificare;
- stimare la variabilità nei risultati per aiutare a determinare le dimensioni del campione per il monitoraggio;
- verificare le ipotesi sulla base di esperienze in altri progetti;
- raccogliere dati per la progettazione;
- valutare le proposte tecniche di analisi dei dati per scoprire potenziali problemi;
- definire informazioni per determinare quali risorse sono necessarie per il progetto su larga scala;
- dimostrare che il progetto è fattibile e può essere finanziato;
- dimostrare ai soggetti economici interessati ciò che il progetto comporterà e che è meritevole di sostegno.

Un programma pilota particolarmente utile sarebbe quello di utilizzare più tipi di attrezzature nello stesso sito e nelle stesse condizioni: si ha così un confronto diretto tra gli equipaggiamenti o le tecniche, e i dati possono mostrare i vantaggi di un'opzione rispetto ad un'altra.

5.5 Valutazioni sulle caratteristiche del sito e dei sedimenti

Vengono ora identificate e descritte le importanti condizioni del sito e le caratteristiche dei sedimenti, di cui è già stato discusso in precedenza, relativi alla valutazione del dragaggio assieme agli strumenti e alle tecniche normalmente applicabili per la raccolta e l'analisi di questi dati.

La conoscenza delle condizioni del sito e delle caratteristiche dei sedimenti è fondamentale per la valutazione di un dragaggio ambientale come potenziale componente di rimedio. Un sito e una caratterizzazione dei sedimenti inadeguati sono una delle cause principali per i problemi connessi con l'attuazione del dragaggio ambientale e possono provocare ritardi, costi più elevati, impatti ambientali inaccettabili, e l'incapacità di soddisfare i livelli di pulizia e gli obiettivi di bonifica prefissati.

Le condizioni del sito rappresentano le caratteristiche globali del corpo d'acqua, dei depositi sedimentari e delle zone circostanti; sono normalmente valutate da una raccolta di informazioni generali e da una serie di sopralluoghi. Le informazioni ottenute possono essere visualizzate in mappe utilizzando il Sistema Informativo Geografico (GIS).

Le caratteristiche dei sedimenti includono le proprietà fisiche, chimiche e biologiche come la distribuzione granulometrica e le concentrazioni dei COC. I dati di caratterizzazione dei sedimenti sono ottenuti attraverso la raccolta di sondaggi o di campioni prelevati in campo e poi testati ed analizzati in laboratorio e sono molto importanti per la definizione del prisma di dragaggio e della raffinazione di un modello concettuale del sito.

Le condizioni sito-specifiche possono influenzare notevolmente la capacità di caratterizzazione del sito stesso, cioè di comprenderne pienamente la natura. Esempi a riguardo includono un alto grado di variabilità nella distribuzione dei contaminanti, difficili/variabili condizioni del fondale, caratteristiche dei sedimenti non favorevoli alle tecnologie di analisi del fondo.

I dati sono utilizzati anche per il confronto con il monitoraggio post-bonifica, per accertare l'effetto delle operazioni di dragaggio; a questo proposito, la coerenza tra il monitoraggio pre e post-dragaggio, è essenziale per consentire un confronto affidabile.

I dati riguardo al sito e ai sedimenti sono necessari per:

- sviluppare e perfezionare il modello concettuale del sito;
- valutare i sedimenti e la destinazione dei contaminanti;
- condurre una valutazione sulla salute umana e sui rischi ecologici;
- valutare i potenziali rimedi;
- progettare e realizzare il rimedio selezionato.

5.5.1 Condizioni del sito

Diversi aspetti dell'ambiente fisico potrebbero rendere la rimozione dei sedimenti più o meno difficile da realizzare. Durante le indagini preliminari devono essere raccolte le seguenti informazioni, in quanto possono influenzare il tipo di apparecchiatura di dragaggio necessaria nonché la fattibilità:

- fonti di contaminazione;

- posizionamento e controllo di indagini a terra;
- accesso al corpo idrico;
- utilizzi del corpo idrico e presenza di infrastrutture;
- modalità per il trasporto, rimaneggiamento, trattamento e smaltimento;
- profondità dell'acqua, batimetria, e pendii della superficie sedimentaria;
- idrodinamica (correnti, onde, maree, etc.) e variazioni stagionali;
- elevazione e natura del substrato roccioso;
- stabilità del litorale;
- presenza ed entità dei residui nei sedimenti;
- considerazioni sull'habitat e restrizioni stagionali dei lavori;
- eventuali condizioni di ghiaccio invernali;
- ambiente acquatico e qualità dell'aria.

Le seguenti sottosezioni riguardano alcune di queste informazioni per la caratterizzazione del sito.

Impostazione del progetto e fonti di contaminazione

La caratterizzazione del sito inizia con una valutazione di carattere generale dell'area, compresi gli usi attuali e storici delle zone limitrofe anche a terra, come siti industriali, scarichi e altre possibili fonti di contaminazione, come le attività di navigazione e i contributi atmosferici.

La fonte di contaminazione deve essere rimossa o controllata prima dell'inizio di una bonifica. Gli scarichi industriali che erano le fonti di contaminanti possono essere stati canalizzati da tempo. Fonti più difficili da controllare sono gli scarichi sotterranei e i sedimenti contaminati stessi, che possono distribuirsi facilmente grazie alle maree o alle tempeste. I contributi relativi di queste modalità di trasporto di contaminanti, sia attuali che storiche, devono essere stimati in modo che possa essere valutata l'efficacia del dragaggio a lungo termine.

Navigazione ed infrastrutture

Gli usi delle vie di navigazione o del corpo idrico o la presenza di infrastrutture all'interno e nelle adiacenze alla zona di intervento possono provocare vincoli sulla natura delle attrezzature di dragaggio utilizzabili e sui periodi di tempo accettabili per il funzionamento dell'equipaggiamento. Gli elementi a tal riguardo che possono essere considerati quando si valuta un dragaggio ambientale sono i seguenti:

- navigazione - la presenza di canali di navigazione o di bacini di manovra all'interno o nelle vicinanze dell'area di progetto è una considerazione necessaria che può avere un impatto sulla selezione delle opzioni di trasporto del materiale, sul posizionamento delle condotte, sulle misure di controllo. Il traffico marittimo ha la precedenza sui canali di navigazione autorizzati, il che significa che i lavori di dragaggio devono essere sospesi;

- turismo - l'uso ricreativo del corpo idrico può influenzare il posizionamento delle condotte necessarie alle draghe idrauliche o richiedere la preferenza di condotte sommerse;
- uso residenziale - la presenza di abitazioni private, moli, etc., può richiedere particolare considerazione sulla qualità della vita (rumore, luce, odori) e sulla potenziale esposizione dei residenti alle sostanze contaminanti;
- strutture in acqua - ponti, moli, chiuse e dighe, o altre opere possono presentare ostacoli a certi tipi dragare e dettare una selezione delle apparecchiature utilizzabili nonché limitare la capacità d'impatto per rimuovere i sedimenti. Molti siti contaminati non sono stati dragati in quanto il dragaggio può influire negativamente su di essi, che risultano stabili in condizioni normali, ma rischiano di crollare quando vengono rimossi grandi volumi di materiale;
- opere di presa e scarico di emissari - prese di alimentazione idrica situate vicino alla zona di progetto possono richiedere controlli supplementari per la risospensione dei sedimenti e il rilascio di contaminanti; gli scarichi possono limitare l'uso dello strato limoso a causa della risospensione;
- ancoraggio - le zone di ormeggio e ancoraggio possono essere colpite durante i lavori: possono essere richiesti ancoraggi alternativi.

Profondità e batimetria

La batimetria è un requisito fondamentale per la caratterizzazione del sito ed è necessario per stabilire la profondità d'acqua, le pendenze del fondale, la variabilità nelle caratteristiche del fondale, in quanto sono tutti fattori utili nella scelta delle attrezzature di dragaggio. Probabilmente sono necessari sondaggi in diverse fasi nel corso del progetto dal momento che i depositi di sedimenti potrebbero non essere fisicamente stabili sotto eventi idrologici periodici. Durante il processo di dragaggio, i rilievi batimetrici svolgono un ruolo importante nel monitoraggio dei progressi dell'operazione.

Anche se sono disponibili diversi metodi per determinare la profondità d'acqua e così la batimetria, l'uso di strumenti acustici è l'approccio più comune. Strumenti di rilevazione acustica possono utilizzare una sonda *single-beam* o attrezzature *multibeam*. Il primo metodo fornisce dati di profondità lungo la linea tracciata dalla sonda, posizionata sotto la barca; il trasduttore multiplo fornisce linee parallele di dati associati ad ogni trasduttore, mentre il multibeam, con molteplici trasduttori nella stessa testa fornisce una banda di punti ravvicinati per una larghezza che va da 2,5 a 7 volte la profondità dell'acqua. I dispositivi multibeam forniscono un'indagine più dettagliata e consentono la mappatura dei singoli posizionamenti della benna della draga, delle creste lasciate tra la benna e i passaggi della testa tagliente, degli affioramenti rocciosi, di altri fattori che riguardano il completamento del dragaggio ambientale. Le apparecchiature *single-beam* sono accettabili quando non è necessaria una risoluzione supplementare durante il rilievo nelle aree in cui le indagini multibeam non forniscono un valore aggiunto, come ad esempio aree omogenee di sabbie consolidate. L'accuratezza delle indagini acustiche è funzione della profondità dell'acqua. Un esempio di traccia di un'indagine acustica è mostrato in figura 5.5.

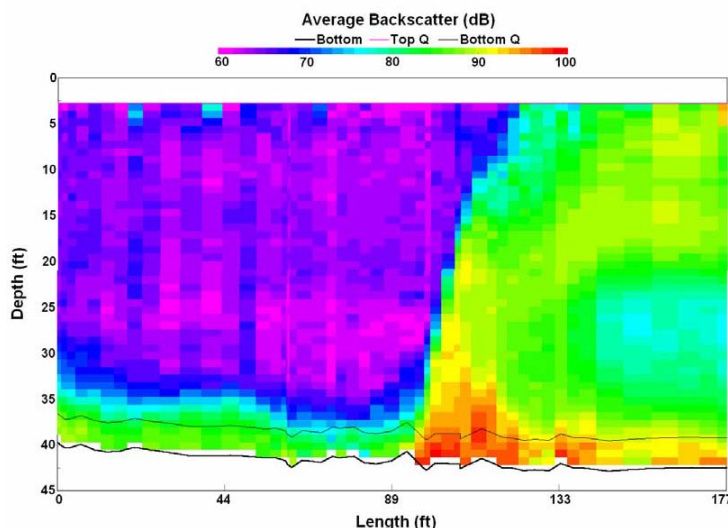


Figura 5.5: Esempio di traccia di un'indagine acustica

Idrodinamica

Per determinare se il dragaggio è fattibile o se debbano essere modificate le attrezzature, occorre analizzare l'idrodinamica del luogo, in modo tale da caratterizzare le onde, le correnti e le maree. Questo serve anche per stimare la dispersione dei sedimenti risospesi e il successivo rilascio dei contaminanti.

Il potenziale cambiamento delle condizioni idrodinamiche dopo il completamento delle operazioni di dragaggio dovrebbe essere considerato soprattutto se si tratta di un dragaggio ambientale, che richiede la copertura dei sedimenti.

Stabilità del litorale

La rimozione dei sedimenti può cambiare la stabilità del pendio o causare l'erosione del territorio di bonifica. Questi cambiamenti dovrebbero essere valutati per garantire che la rimozione dei sedimenti non aumenti l'erosione o si verifichi un'instabilità strutturale delle strutture litoranee. Una valutazione geotecnica della pendenza del litorale o della stabilità dell'infrastruttura litoranea può essere necessaria per determinare le limitazioni alla rimozione dei sedimenti nearshore. Un esempio di linea guida per la valutazione del potenziale impatto di dragaggio adiacente ad una struttura litoranea è mostrata in figura 5.6: qualsiasi dragaggio all'interno delle zone critiche e di attenzione richiederà in primo luogo una dettagliata valutazione geotecnica e strutturale per confermare la stabilità delle strutture esistenti, e l'impatto del dragaggio su di essa. La rimozione di materiale dal piede di un pendio o di una paratia ridurrà la resistenza allo scorrimento. Poiché i sedimenti contaminati spesso si accumulano nelle adiacenze ai vecchi impianti industriali, è del tutto possibile che molte delle strutture (paratie, pilastri, pareti) si troveranno ad essere marginalmente stabili nella loro attuale condizione, ma sono soggette a danni significativi se il dragaggio avviene nella zona critica, e a possibili danni se esso viene fatto nelle altre zone di attenzione. Di conseguenza, il dragaggio lungo i pendii vicini alle strutture rendere necessaria la modifica della pendenza per proteggerle da eventuali danni.

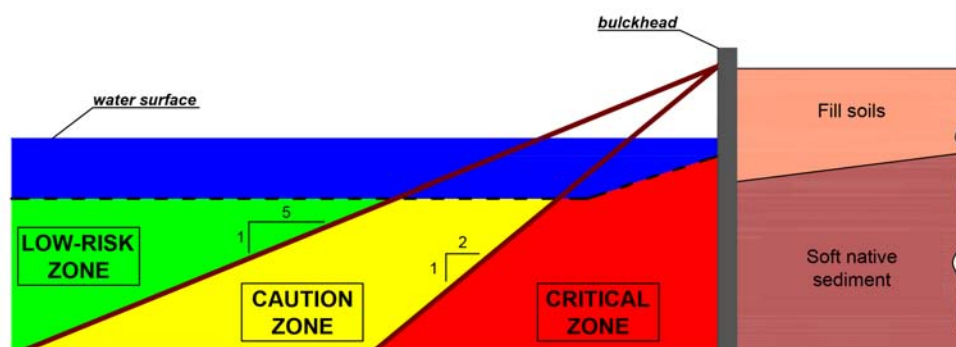
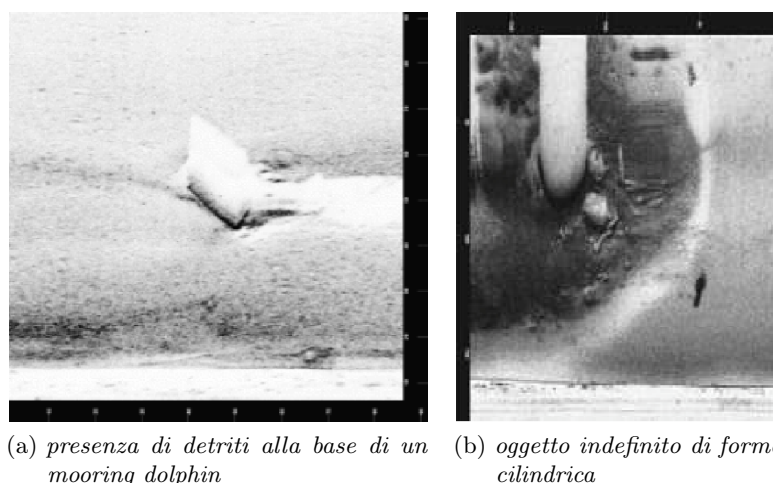


Figura 5.6: Linea guida per la stabilità delle strutture litoranee

Presenza ed entità dei detriti

La portata e la natura di eventuali detriti sono considerazioni chiave per un dragaggio selettivo: essi potrebbero essere considerati una caratteristica sedimentologica, ma sono normalmente valutati sulla base dell'intero sito in quanto hanno dimensioni maggiori di quella riferimento dei sedimenti, e quindi sono considerati come condizione del sito. Deve essere condotta un'indagine sui detriti e, se necessario, deve essere sviluppato un piano di gestione per la loro rimozione, decontaminazione e smaltimento.

Sono disponibili diversi metodi per valutare la natura e la portata dei detriti, tra cui sonar a scansione laterale, sonar a scansione settoriale, magnetometria, indagini di metal detector, indagini subacquee, ispezioni litoranee, e sonde fisiche. La prima tecnica fornisce una fotografia della superficie sedimentaria, così gli oggetti detritici superficiali possono essere identificati facilmente; la principale limitazione consiste nel fatto che possono essere distinte solo le caratteristiche superficiali mentre l'entità dei detriti al di sotto della superficie non può essere determinata. Immagini acquisite con sonar a scansione settoriale possono fornire anche informazioni sulla consistenza dei sedimenti di superficie. Esempi di immagini tramite sonar a scansione laterale, che rivelano detriti grandi e piccoli sono riportati in figura 5.7. I magnetometri forniscono dati sulla intensità di rendimento magnetico, il quale



(a) presenza di detriti alla base di un mooring dolphin (b) oggetto indefinito di forma cilindrica

Figura 5.7: Immagini di sonar a scansione

è indicativo di oggetti metallici ferrosi sia superficiali che sepolti. Tuttavia, la presenza di accatastamenti di metallo vicino alle banchine può inibire il segnale proveniente dai detriti, rendendo i dati relativamente inutilizzabili. Esempi di

mappe di intensità magnetometrica sono riportati in figura 6.4. I sondaggi tramite sonda fisica possono essere utilizzati per determinare la profondità di seppellimento dei detriti.

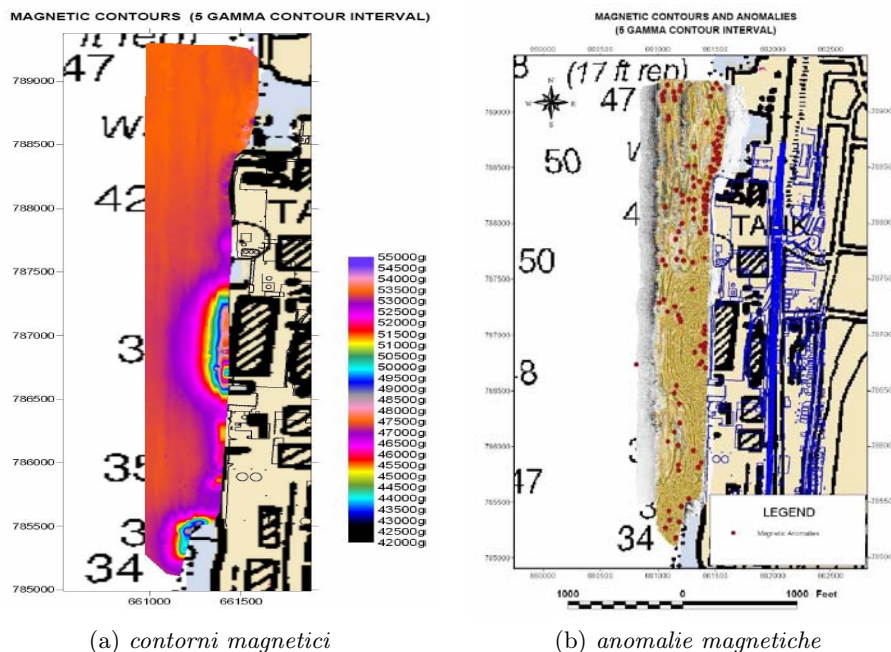


Figura 5.8: Esempi di risultati del sondaggio magnetico

Considerazioni sugli habitat e restrizioni stagionali

La potenziale perdita degli organismi acquatici, la distruzione dell'habitat marino e i cambiamenti a lungo termine del corpo idrico devono essere considerati durante la valutazione di un dragaggio ambientale. In alcuni casi, queste considerazioni possono influenzare la scelta delle attrezzature di dragaggio, il metodo di operazioni o la necessità di misure di controllo.

Vengono comunemente poste sulle operazioni di dragaggio delle limitazioni stagionali e, simili restrizioni possono essere imposte anche sugli interventi di bonifica. Il sistema di restrizioni deve essere determinato nelle prime fasi di indagine o valutazione da parte delle agenzie governative. Questi vincoli, dettati da preoccupazioni ambientali, limitano la durata della stagione di dragaggio e possono avere un impatto significativo sulla produzione e sulla durata totale richiesta dal progetto.

L'impatto della perdita o dell'alterazione di habitat è un'altra considerazione: mentre un progetto può essere strutturato per ridurre al minimo la perdita di un habitat, o addirittura per migliorarlo, la rimozione dei sedimenti e lo smaltimento, così come la loro copertura, alterano l'ambiente. È importante però bilanciare la perdita di un habitat contaminato con il vantaggio di fornirne un nuovo, modificato, ma meno contaminato.

Un'altra considerazione è quella di evitare impatti ecologici a breve termine durante il dragaggio. Questo potrebbe comportare la suddivisione temporale del progetto, per evitare effetti negativi sulla qualità dell'acqua durante i periodi di migrazione e allevamento di speci sensibili, o di fare in modo che il progetto riduca al minimo la sospensione dei sedimenti durante le fasi di dragaggio e smaltimento.

5.5.2 Caratterizzazione dei sedimenti

L'obiettivo della caratterizzazione dei sedimenti è quello di determinarne volume, spessore, posizione, carattere fisico e chimico e grandezza di contaminazione presente. Questa sezione sintetizza i principi e le considerazioni per il campionamento e l'analisi dei sedimenti e dell'acqua, importanti per la valutazione di un dragaggio ambientale.

Piani di campionamento e qualità dei dati

L'obiettivo generale del piano di campionamento è quello di definire una strategia di campionamento che deve fornire dati sufficienti per affrontare le informazioni richieste dal progetto. L'obiettivo del campionamento iniziale è quello di definire i confini della zona di impatto, per valutare la variabilità generale dei materiali e la distribuzione dei contaminanti, e di identificare le aree che dovrebbero essere campionate più intensamente. L'area da campionare può essere suddivisa in unità di gestione discrete basate su fattori idrodinamici, livello atteso di contaminazione o altre caratteristiche sito-specifiche pertinenti. Può essere necessario un secondo campionamento per affrontare le incongruenze nei dati, per affinare gli intervalli di composizione o i luoghi di campionamento, le aree critiche in modo più intenso o per migliorare il livello di confidenza associato a determinati parametri. Alcuni elementi chiave del piano di campionamento sono:

- contesto del progetto;
- sintesi dei dati esistenti e valutazione;
- coordinate del campione, compatibili con i sistemi di navigazione GPS;
- metodo di posizionamento e di precisione (verticale e orizzontale);
- metodo per stabilire il profilo della superficie libera durante il campionamento;
- numero di campioni;
- metodo di campionamento e attrezzature;
- contenitori e conservazione;
- procedure di decontaminazione;
- imballaggio, etichettatura, trasporto, trattamento e custodia;
- analiti chimici;
- proprietà fisiche e geotecniche da testare;
- procedure di analisi, metodi di estrazione;
- criteri ambientali applicabili;
- analisi dei dati;
- gestione e smaltimento dei residui.

Apparecchiature e tecniche di campionamento

I sedimenti superficiali possono essere raccolti per l'analisi utilizzando campionatori a presa: questo metodo di campionamento è comunemente utilizzato negli studi di ricognizione, tuttavia, per valutazioni ulteriori, sono di solito necessari dei carotaggi per ottenere campioni a diverse profondità; questi possono essere eseguiti con le tecniche di campionamento convenzionali per il terreno. L'utilizzo di campionatori a tubo lungo come i *vibracore* e i dispositivi *impact core* si è rivelato un metodo relativamente a basso costo. L'operazione consiste nel infiggere un tubo, di diametro pari a 10 centimetri, lungo circa 6 metri, in alluminio nel fondale mediante applicazione di vibrazioni sulla sommità del tubo. Esempi di queste apparecchiature sono riportate in figura 5.9.

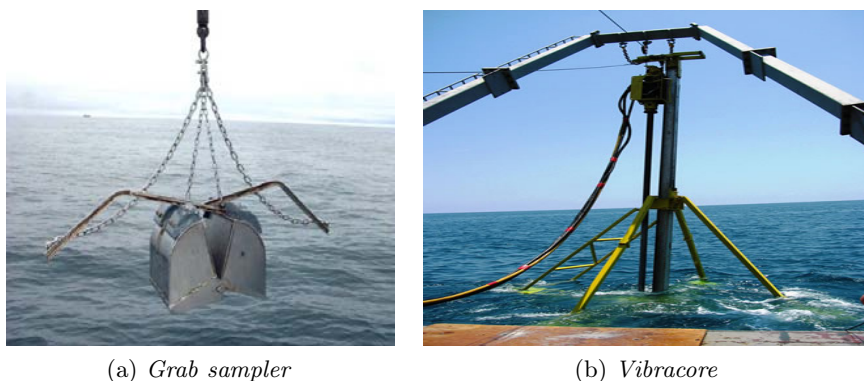


Figura 5.9: Esempi di attrezzature di campionamento

Compressione, segmentazione, e composizione

Anche se il campionamento a tubo lungo fornisce un metodo relativamente economico per la raccolta di campioni, spesso si riscontrano incertezze sulla profondità effettiva del sedimento campionato. Ad esempio, non è raro trovare che la lunghezza del sedimento recuperato è solo una frazione della dimensione di tubo infisso nel fondale: un campionario infisso per 5 metri con 3.5 metri di campione prelevato, fornisce solo il 75 % della capacità di campionamento totale. La difficoltà sorge nel decidere come contabilizzare la parte perduta della carota. Le possibili spiegazioni sono le seguenti:

1. una frazione è caduta fuori dal tubo durante il campionamento;
2. il materiale nel tubo si è compattato;
3. dopo una certa distanza, il materiale ha formato un tappo nel tubo che impediva al resto di penetrare all'interno;
4. dei detriti ostruivano l'estremità del tubo e impedivano ai primi metri di materiale di penetrare fino a che il tappo non è stato perforato dall'azione di guida;
5. una combinazione di quanto sopra.

L'esperienza ha dimostrato che queste sono tutte spiegazioni ragionevoli e che è molto difficile da determinare come ripartirle per ogni campione prelevato. Pertanto, con un recupero del 75 % da un tubo di 5 m, ci sono circa 1.2 metri di incertezza sulla posizione del contatto tra lo strato di sedimenti contaminato e

quello pulito. Sono state sviluppate recentemente apparecchiature di carotaggio per misurare l'effettivo recupero incrementale durante l'estrazione di campioni tramite campionatori a tubo lungo, che permettono la determinazione del rapporto di sedimenti nel tubo con le reali condizioni del luogo. In alternativa, il campionamento può essere più controllato impiegando al posto di campioni a tubo lungo, altre attrezzature di perforazione.

Una volta che le carote sono state recuperate, i campioni devono essere segmentati verticalmente per le prove di laboratorio, con ciascun segmento analizzato separatamente. Stabilire la profondità di dragaggio è un elemento importante di un'indagine perché ogni incremento di profondità è costosa non solo per dragaggio stesso ma anche per il successivo trattamento/smaltimento. Particolarmente utili poi possono essere dati fisici e chimici associati per l'interpretazione dell'entità e della natura della contaminazione.

Proprietà del materiale

Le informazioni sulle proprietà fisiche dei sedimenti sono necessarie per la selezione delle attrezzature, le stime di produzione, la determinazioni della dragabilità ed il piano dei sistemi idraulici di dragaggio. Questi dati sono anche fondamentali per la valutazione sulla stabilità dei versanti, il trattamento dei sedimenti, e le opzioni di smaltimento. Le proprietà sono suddivise in due categorie: fisiche e geotecnico/meccaniche. I parametri fisici di particolare interesse per il dragaggio sono:

- concentrazione e variabilità dei sedimenti solidi in sito; la prima può essere espressa come percentuale in peso di solidi, contenuto d'acqua, densità di volume bagnato o asciutto, e come indice dei vuoti o porosità;
- limiti di Atterberg (plasticità);
- peso specifico dei solidi;
- distribuzione granulometria;
- contenuto organico, fase oleosa;
- presenza di detriti di grandi dimensioni e dispersi.

I parametri geotecnico/meccanici di particolare interesse per il dragaggio sono:

- resistenza al taglio;
- compressione, consolidamento;
- caratteristiche erosive;
- sedimentazione, filtrazione, permeabilità;
- produzione di gas.

Dal momento che diverse tecniche e attrezzature di dragaggio rimuovono sedimenti con differenti percentuali di solido, a causa delle diverse quantità di acqua aggiunta, è essenziale una determinazione accurata della massa di sedimenti solidi nel prisma di dragaggio per la selezione delle attrezzature, la progettazione del trasporto, la stima dei tassi di produzione e di durata del progetto. La distribuzione granulometrica è comunemente determinata da analisi meccaniche per sabbia e frazioni più grandi, e da idrometro per frazioni a grana fine.

Concentrazioni di agenti contaminanti

La determinazione della cosiddetta *massa chimica del sedimento*, ossia la concentrazione dei contaminanti di interesse² nei sedimenti, è una componente importante per determinare i volumi di sedimenti da dragare. I parametri chimici dei sedimenti che possono interessare sono:

- superficie e concentrazioni di agenti contaminanti in prossimità della superficie sedimentaria;
- concentrazioni di contaminanti disciolti e totali nel corpo idrico;
- concentrazioni di agenti contaminanti nelle acque sotterranee;
- profili di concentrazione del carbonio organico totale (TOC) e del carbonio organico disciolto (DOC) nei sedimenti superficiali e profondi;
- concentrazioni di carbonio organico totale (TOC) e di carbonio organico disciolto (DOC) nelle acque di superficie;
- concentrazione totale di solidi sospesi nelle acque di superficie;
- acido solfidrico volatile (AVS) e contemporaneamente metalli estratti nei sedimenti (SEM);
- altre specie chimiche che possono influenzare la mobilità dei contaminanti;
- presenza e natura dei liquidi in fase non acquosa (NAPL) nei sedimenti;
- potenziale di ossido-riduzione e pH dei campioni;
- rapporto di carbonio/azoto/fosforo;
- concentrazione di ammoniaca non ionizzata;
- salinità.

Sebbene le concentrazioni in prossimità della superficie dei COC siano importanti ai fini della valutazione del rischio, il profilo di concentrazione dei contaminanti in rapporto alla profondità è la base per la selezione della linea di taglio per soddisfare un dato livello di pulizia (CUL). Parametri come l'AVS/SEM, TOC, e la presenza di NAPL servono per interpretare le potenzialità della mobilità dei contaminanti di interesse a causa della risospensione dei sedimenti.

5.5.3 Requisiti di rimozione

Raccolti i dati, possono essere determinati i requisiti di rimozione per il progetto, che dovrebbero includere tutti le opzioni relative alla rimozione separata dei detriti, alla dragabilità complessiva dei sedimenti da rimuovere, e ad un calcolo iniziale del volume da dragare.

²Contaminants of Concern (COCs) – sono le sostanze chimiche trovate in sito ritenute dannose per la salute umana e l'ambiente

Debris removal

Il bisogno ed il potenziale successo di un'operazione di rimozione separata dei residui deve essere determinata sulla base di indagini sugli stessi; la valutazione deve prendere in considerazione la risospensione e gli impatti sulle proprietà dei sedimenti e sulla dragabilità. La presenza di detriti/rifiuti può avere un impatto negativo sul successo delle draghe idrauliche più piccole, spesso utilizzate per la bonifica dei sedimenti. Piccoli detriti, dai 15 ai 30 centimetri di diametro, in grado di tappare la condotta di aspirazione della draga. Cavi e catene possono avvolgersi intorno alla testa tagliente rendendola inefficace (figura 5.10), e altri rifiuti possono bloccare il percorso di oscillazione del rotore di taglio. Altre



Figura 5.10: Groviglio di cavi sulla testa tagliente

strutture, come pali incorporati nel fondale, richiedono un'operazione di rimozione separata, come i rifiuti di grandi dimensioni e gli oggetti metallici ingombranti, che non possono essere prelevati con la benna della draga. Una delle conseguenze negative nel condurre una rimozione separata di detriti è la potenziale distruzione del suolo, intrinseca all'azione di rimozione stessa. Se il sedimento viene perturbato significativamente può perdere resistenza al taglio e diventare più una miscela densa, difficile da catturare durante le operazioni di dragaggio.

Dragabilità

Il termine *dragabilità* si riferisce a quella parte del tasso di produzione ed energia richiesti per la rimozione da un determinato tipo draga, che sia direttamente influenzato dalle proprietà del sedimento. Essa si riferisce alla facilità con cui i sedimenti possono essere rimossi da un dato tipo di draga ed è strettamente correlata alla resistenza al taglio degli stessi. Per esempio, i sedimenti non consolidati, come argille depositatesi recentemente, limi e sabbie, sono altamente dragabili, mentre argille fortemente consolidate, materiali cementati, o roccia sono più difficili da dragare. Il tasso di produzione e l'efficienza della rimozione del sedimento sono funzioni delle condizioni del sito, delle proprietà e dello spessore dei sedimenti, nonché del tipo di apparecchiatura. Teoricamente, qualsiasi materiale può essere rimosso tramite dragaggio, fino alla roccia dura, se viene impiegata la giusta attrezzatura, tuttavia, il dragaggio ambientale richiede un bilanciamento dell'efficienza di rimozione con altri processi. Nella maggior parte dei casi, i sedimenti contaminati sono associati a frazioni fini di sedimenti depositati recentemente (argille, limi e sabbie), che hanno una resistenza al taglio piuttosto bassa e non presentano

alcun problema per quanto riguarda la dragabilità; tuttavia, vi possono essere altre frazioni o materiali all'interno della massa dei sedimenti, come ad esempio, detriti, massi, particelle di legno, etc., che possono avere maggiore granulometria ed essere più difficile da rimuovere.

5.6 Attrezzature di dragaggio ambientale

Questa sezione descrive le attrezzature ed i metodi di dragaggio comunemente impiegati per scopi ambientali e le varie funzionalità delle draghe: negli ultimi anni è stata sviluppata una nuova gamma di prodotti, basata sulla tecnologia esistente, ma che prende in considerazione l'obiettivo principale di migliorare le prestazioni di tali macchine nell'ambito più strettamente ambientale, ossia quello della rimozione di sedimenti contaminati. I miglioramenti raggiunti riguardano in particolare:

- la precisione richiesta per realizzare un profilo di scavo predefinito è stata aumentata in modo da ridurre il più possibile il volume di sedimenti contaminati da dragare e per facilitare il dragaggio selettivo di strati con differenti caratteristiche di contaminazione;
- l'automazione dell'equipaggiamento di monitoraggio e controllo a bordo delle draghe, specialmente per un migliore posizionamento degli strumenti di scavo, è stata enormemente aumentata, per far fronte alla geometria variabile degli strati inquinati;
- l'attrezzatura è stata adattata per aumentare la densità della miscela nella condotta, in modo da limitare il volume di materiale che necessita di ulteriori trattamenti e/o rilocazione;
- la produzione di sedimenti sospesi nella fase di dragaggio e scarica è stata ridotta per evitare la dispersione di sedimenti inquinati;
- sono state fatte rifiniture per evitare, o quantomeno ridurre, la formazione di perdite dagli strati;
- l'atteggiamento tipico di cercare il più alto tasso di produzione è stato attenuato, soprattutto per i progetti di dragaggio correttivo, per tenere conto dei costi ecologici;
- sono state adottate dalle industrie di dragaggio procedure di controllo della qualità, per garantire continuamente alti standard qualitativi nell'intero progetto di dragaggio.

5.6.1 Disc bottom dredger

È sostanzialmente una classica draga stazionaria attrezzata con un disgregatore fatto a tamburo, con fondo chiuso, composto di lame che ruotano secondo un asse verticale; la bocca di aspirazione che riceve il materiale è situata dentro al tamburo, in modo da non consentire perdite localizzate. Inoltre un cofano aggiustabile, per tutta l'altezza del tamburo, viene azionato per prevenire l'ingresso di acqua quando il disgregatore lavora in una zona senza materiale, oppure per limitare l'aspirazione incontrollata del sedimento.

Un sistema computerizzato di controllo consente l'aggiustamento automatico della profondità di scavo, dell'apertura del cofano per l'altezza dello strato che si

vuole rimuovere e della portata in aspirazione. Un sistema di degassificazione è installato a bordo della draga per impedire fenomeni di cavitazione ed aumentare la densità della miscela. La sicurezza dell'equipaggio è garantita dal circuito



Figura 5.11: Esempio di Disc bottom dredger

assolutamente chiuso di tubazioni e refluimento. L'accuratezza di esecuzione è sostanzialmente la stessa della draga stazionaria, potenziata dal sistema di posizionamento collegato al controllo computerizzato, per cui si possono raggiungere precisioni nel taglio fino a 10 cm.

La *Disc bottom dredger* rimane una draga idraulica, per cui un minimo di acqua aggiuntiva per consentire l'aspirazione ed il pompaggio viene richiesto; in particolare, durante le operazioni di escavo (inversione del brandeggio, calata dei piloni di ancoraggio ed avanzamento, messa a regime dopo gli arresti, etc.) la quantità di acqua pompata potrebbe risultare eccessiva, ma un sistema, anch'esso legato al sistema di controllo computerizzato, diminuisce la portata liquida compatibilmente con la velocità critica di trasporto nella condotta di refluimento.

Il livello di rumore è quello di una normale draga a disgregatore con gruppi motore diesel, eventualmente silenziati con opportune marmitte.

La produttività è ovviamente ridotta rispetto ad un'analogia draga tradizionale a disgregatore, perchè il fatto di limitare la torbidità all'ingresso del disgregatore con il cofano rotante, di variare i giri della pompa in funzione di limitare l'apporto di acqua aggiuntiva e, in generale, l'attenzione posta più sul controllo delle operazioni che sull'ottimizzazione della produzione, fanno realizzare alla *Disc bottom dredger* produzioni orarie intorno ai $500 \text{ m}^3/\text{ora}$.

5.6.2 Sweep dredger

Questo tipo di draga utilizza una tecnica speciale ed innovativa per la rimozione selettiva di strati di sedimenti contaminati.

Per realizzare la *Sweep dredger* è stata utilizzata una classica draga a disgregatore; la principale modifica è il cambio del disgregatore con una testa raccoglitrice (pialla), caratterizzata dalla possibilità di lavorare nelle due direzioni.

Lo sviluppo di questa nuova tecnica di dragaggio ha posto particolare attenzione alla possibilità di dragare strati sottili di sedimenti con poca quantità di acqua, grazie:

- al controllo dell'apertura della bocca di aspirazione per minimizzare l'acqua di trasporto;

- all'ampliamento del campo di applicazione in rapporto alla profondità di dragaggio minima e massima;
- all'ottimizzazione della produzione fra la sezione di taglio e l'aspirazione.

La draga è equipaggiata con diversi sistemi di controllo e monitoraggio che controllano il processo di dragaggio. Il sistema è completamente integrato in modo da realizzare un processo ottimale. Inoltre questa macchina può essere utilizzata nei due sistemi (sweep e disgregatore) con la sola sostituzione della testa di dragaggio. Quest'ultima è montata su una struttura fissa installata sulla draga, con la possibilità di aggiustare la posizione della pialla sia nel senso orizzontale che verticale: essendo la visiera regolabile (da 10 a 60 cm) è possibile dragare strati sottili e strati variabili con una grande precisione. La draga è equipaggiata con un



Figura 5.12: Esempio di Sweep dredger

sistema che permette il controllo in tempo reale del processo di dragaggio anche in relazione al profilo del fondale esistente. Con una draga con testa raccoglitrice a pialla, l'incremento della torbidità è molto basso, questo è dovuto alla quasi totale eliminazione della funzione di agitazione e alimentazione di acqua per il trasporto idraulico che avviene estensamente alla bocca di aspirazione.

La visiera regolabile della *Sweep dredger* e la possibilità di regolare il taglio in modo continuativo, per aggiustarlo in funzione dell'altezza del materiale da dragare, fanno sì che nessuna parte dei materiali possa rimanere sopra la pialla. La continua regolazione della bocca di aspirazione in funzione del materiale da asportare, permette che esso venga aspirato con la stessa densità che si ha in situ. La sicurezza, in relazione al contatto umano con il materiale inquinato, è ottima, dato che la *Sweep dredger* lavora con un circuito idraulico chiuso.

Essa permette una produzione nominale di circa $1\,000\text{ m}^3/\text{ora}$ con uno spessore utile di 50 cm; con strati minori, la produzione diminuisce dato che la velocità di dragaggio varia di poco.

5.6.3 Environmental auger dredger

Questo tipo di draga, specialmente di piccole dimensioni, è stato molto impiegato nei piccoli progetti di risanamento di acque interne o laghetti urbani. È sostanzialmente una draga stazionaria attrezzata con una coclea che taglia il sedimento da asportare in spessori anche limitati, da un metro fino a pochi centimetri.

Il sistema di controllo consente di mantenere costante lo spessore di taglio. La coclea convoglia il materiale verso il centro, dove una bocca di aspirazione dirige il

sedimento verso la pompa che refluisce la miscela lontano. L'effetto dell'aspirazione e la presenza di un cofano intorno alla coclea, impedisce la dispersione del sedimento e la formazione di torbide. La larghezza del taglio dipende dalla lunghezza della coclea, che in genere varia da 2 a 14 metri.

Un avanzato sistema di controllo automatizzato computerizzato consente di monitorare ed ottimizzare le operazioni di rimozione del sedimento, mentre un sistema di degassificazione è montato nel gruppo pompa in modo da prevenire cavitazione e realizzare il massimo addensamento della miscela. La *Auger* è una



Figura 5.13: Esempio di Environmental auger dredger

dragga stazionaria che si posiziona mediante i piloni di ormeggio e avanzamento ma l'accuratezza del taglio, garantita dal sistema computerizzato di controllo, è molto maggiore di quella di una normale draga aspirante-refluente ed arriva a pochi centimetri: 10, con operazioni molto accurate. La coclea è completamente contenuta nel cofano e quindi non produce torbidità durante le operazioni.

Il sistema automatico di controllo consente di lavorare con grande precisione strato per strato il sedimento contaminato; soltanto variazioni improvvise di dimensione dello strato da asportare (larghezza o spessore), possono costituire problemi all'accuratezza stessa, non potendo essere facilmente sostituita la coclea con una di dimensioni più adatte. In ogni caso, la mappatura pre-dragaggio sarà un utile strumento per decidere le dimensioni della coclea più adatta per ogni progetto.

Essendo una draga idraulica, la *Auger* necessita di un certo quantitativo di acqua aggiuntiva. La produttività è dipendente dalla larghezza della coclea e comunque risulta molto inferiore a quella di una draga stazionaria a disgregatore di caratteristiche analoghe, per gli effetti riducenti dell'accuratezza del taglio e della prevenzione della torbidità: le massime produzioni realizzabili sono nell'ordine dei $500 \text{ m}^3/\text{ora}$.

5.6.4 Scraper dredger

È una piccola chiatta dotata nella parte anteriore di una larga catena continua di lame di taglio, all'estremità inferiore, le lame raschiano gli strati superiori di sedimenti su piano inclinato. Le lame e l'effetto del piano fanno sì che il materiale venga inglobato e, tramite un contenitore, viene prelevato per il successivo trasporto.

Al termine del raccoglitore è installata una vite di Archimede, per convogliare il materiale scavato ad alta densità verso la pompa, che può essere centrifuga o volumetrica; quest'ultima è particolarmente adatta per trasportare materiale con densità pari a quella in situ.

Rispetto alle draghe tradizionali, la *Scraper dredger* offre una serie di miglioramenti che rispettano i criteri ambientali:

- precisione: la scraper dredger è basata sul principio del taglio meccanico. Il bordo tagliente può essere posizionato con precisione e, dal momento che può essere mantenuto alla stessa profondità senza interruzioni o cambiamenti durante il ciclo di dragaggio, viene garantita una superficie di taglio molto liscia. Si può raggiungere così una precisione pari a meno di 5 centimetri;
- sospensione: dal momento che la catena continua gira in direzione opposta rispetto ad una draga tradizionale a secchie, il materiale viene subito deposto in un raccoglitore chiuso garantendo il minimo contatto tra il materiale e la colonna d'acqua; la formazione di sedimenti sospesi è così molto limitata;
- selezione: è possibile eseguire uno scavo strato per strato. Il bordo tagliente rimane sempre in posizione orizzontale; se è richiesta un'intersezione variabile o inclinata tra due strati, la *Scraper dredger* non è in grado di seguirla in modo esatto. Nei modelli più recenti la chiatta viene zavorrata in modo tale da tagliare anche piani leggermente inclinati;
- diluizione: durante le fasi di taglio e trasporto verticale, non viene introdotta acqua aggiuntiva. Per il successivo trasporto orizzontale vengono utilizzate generalmente pompe idrauliche, che richiedono aggiunta di acqua;
- produzione: considerando la dimensione della draga e le difficoltà legate alla raccolta e al pompaggio, il tasso di produzione è limitato. Si raggiungono valori da 50 a 200 m^3/ora ; con l'utilizzo di pompe volumetriche invece la produzione si assesta a circa 100 m^3/ora .

5.6.5 Environmental grab dredger

È un escavatore idraulico dotato di una benna speciale, progettata con le seguenti caratteristiche:

- durante l'apertura e la chiusura, il bordo tagliente giace sempre sullo stesso piano orizzontale;
- l'apertura e la chiusura sono garantite da un gruppo idraulico incorporato o, in modo meccanico, da uno speciale sistema di cavi;
- in posizione di chiusura, tutte le aperture sono sigillate per minimizzare le perdite di materiale lungo la colonna d'acqua percorsa dalla benna stessa nel suo movimento dal fondo alla superficie;
- la gru è equipaggiata con un sistema di posizionamento sul braccio per misurare con una certa accuratezza l'avvolgimento del cavo; inoltre è utilizzato un codificatore che misura la lunghezza del cavo mollato per risalire precisamente alla profondità della benna nel corso dello scavo.

Questo tipo di benna può essere installato in una tradizionale draga a benna mordente o in una draga a cucchiaio. L'ultima generazione di tali benne permette



Figura 5.14: Esempio di Environmental grab dredger

posizionamento e guida migliori del bordo tagliente durante lo scavo. Questo sistema, benchè abbia dei vantaggi significativi per quel che riguarda la densità del materiale dragato, sotto certi punti di vista non è comparabile con i sistemi precedentemente analizzati: per tale motivo quindi, deve essere spesso supportato da ulteriori misure di protezione.

L'*Environmental grab dredger* è adatta alla rimozione di piccoli volumi in siti con scarsa accessibilità e per progetti dove i costi di disidratazione o di trattamento del materiale dragato sono alti in proporzione al volume del materiale.

5.6.6 Scoop dredger

È simile ad una classica draga a disgregatore, ad eccezione della testa di dragaggio che è stata appositamente progettata per dragaggi ecologici di disinquinamento. Essa consente di asportare materiale con la stessa densità che in situ. Il particolare disegno della pompa di dragaggio, la velocità dei verricelli di brandeggio e la particolare testa raccoglitrice, permettono di ottenere concentrazioni di materiali superiori all'80 %, contro concentrazioni convenzionali di circa il 20 %.



Figura 5.15: Esempio di Scoop dredger

Tutte le operazioni sono controllate mediante un sistema computerizzato che permette un'operazione di dragaggio praticamente automatica, atta ad ottenere il parametro guida impostato. Generalmente questi sistemi vengono adottati per ottimizzare la produzione del mezzo, nel caso specifico lo scopo è quello di ottenere

un'alta concentrazione della miscela, precisione di taglio, bassa torbidità, per evitare la dispersione dei sedimenti contaminati.

La *Scoop dredger* ha una buona produzione sul dragaggio ambientale per il risanamento dei sedimenti di fondo ($1\,000\text{ m}^3/\text{ora}$), ed è giudicata particolarmente positiva per le seguenti ragioni:

- accuratezza e selettività intorno ai 10 cm ad una profondità di 15 m;
- torbidità causata dalla testa di dragaggio molto limitata;
- buona sicurezza: non c'è contatto diretto con il materiale dragato, circuito idraulico chiuso;
- sensibilità alle ostruzioni: non ci sono tempi di ritardo per grosse ostruzioni.

La *Scoop dredger* ha però degli aspetti negativi durante il dragaggio di strati molto sottili, in particolare la quantità di acqua risulta relativamente alta.

5.6.7 Cable arm bucket

Inizialmente il *Cable arm bucket*, progettato da Ray Bergeron, e successivamente brevettato nel 1989, era impiegato per lo scarico di ingenti volumi di grano. Successivamente, è emerso che poteva avere un potenziale per il dragaggio di sedimenti non consolidati. L'apertura, il taglio e la chiusura sono controllati da due cavi di acciaio. Un cavo comanda l'apertura della benna utilizzando quattro catene distanziatrici per guidare due piastre laterali che si aprono; il secondo, comanda la chiusura ed il sollevamento ed opera attraverso una serie di pulegge a sbalzo per consentire la chiusura delle due piastre laterali, ad una velocità controllata. Una catena che collega la benna e la gru ne mantiene l'allineamento. Per diminuire la pressione dell'acqua verso il basso durante la discesa della benna aperta, attraverso la colonna d'acqua, delle bocchette in ciascuna piastra laterale vengono aperte per permettere all'acqua e all'aria intrappolate di fuoriuscire. L'apertura delle piastre laterali raggiunge circa i 180° e, con l'azione del perno galleggiante, produce un taglio rettangolare più grande, eliminando così l'effetto buca prodotto da un secchio convenzionale. Ad esempio, una benna a conchiglia convenzionale da 4500 litri di capacità, produce un impronta di circa 5.5 m^2 , mentre una *Cable arm bucket* ne produce una di 13.5 m^2 . Le figure 1 e 2 illustrano secchi braccio per il cavo.

Il primo impiego nel dragaggio risale a due diversi progetti realizzati nel 1992, evidenziando sia una superficie maggiore che un livello di taglio più efficiente rispetto alle benne di capacità simile, con l'aggiunta di un tasso di produzione più elevato. Successivamente, sono state valutate ed implementate soluzioni per impieghi nel dragaggio ambientale. Le caratteristiche principali del *Cable arm bucket* sono le seguenti:

- il peso più leggero rispetto ad una benna convenzionale, è il risultato dell'utilizzo di acciaio ad alta resistenza e dell'assenza di contrappesi;
- prese d'aria in ogni piastra laterale si aprono automaticamente in discesa per ridurre al minimo la pressione dell'acqua e di conseguenza diminuire la turbolenza, che potrebbe produrre risospensione dei sedimenti; le stesse si chiudono automaticamente in salita, per evitare perdite di materiale dragato;
- la progettazione ed il funzionamento della benna consentono il montaggio di sensori computerizzati e dispositivi di registrazione dati sulla parte interna



Figura 5.16: Cable Arm's Environmental Clamshell

delle piastre laterali. Dati come solidi sospesi totali (SST), pH, temperatura, torbidità e conducibilità possono essere ottenuti in tempo reale durante il movimento della benna nella colonna d'acqua. Inoltre, può essere installato un sistema di controllo e monitoraggio, che include ecometri, trasduttori di pressione, videocamere, e una fonte di luce, il tutto collegato ad uno schermo in cabina. Questo permette all'operatore di disporre di dati sulla profondità d'acqua, profondità di penetrazione benna, rotazione, e mappatura dell'area di destinazione (che può essere resa compatibile con i sistemi di posizionamento GPS);

- in fase di risalita, l'acqua contaminata intrappolata sopra il carico può drenare attraverso le aperture delle piastre laterali, aumentando così il rapporto acqua/solido;
- la benna può essere dotata anche di vibratori pneumatici che, se attivati, facilitano la fuoriuscita del materiale, quando questa si apre per lo scarico; prima del taglio successivo, deve essere fatto un ciclo di lavaggio in quanto, dopo lo scarico, un sottile strato di materiale dragato (contaminato) rimane aderente alle superfici interne della benna. Se non rimosso, potrebbe diventare risospeso quando la benna viene nuovamente abbassata nella colonna d'acqua.

L'efficacia del *Cable arm bucket* dipende dalla qualifica e dall'esperienza dell'operatore, nel rispetto delle procedure operative e con condizioni del fondo adatte, (Bergeron, Cushing *et al.* 2000).

5.6.8 Pneumatic dredgers

La caratteristica principale degli impianti di sistema Pneuma³, funzionanti ad aria compressa, consiste nella mancanza di parti rotanti, o qualsiasi tipo di meccanismo, a contatto con la miscela da pompare. Per gravità, il liquido passa attraverso le valvole esterne, che funzionano automaticamente, ed entra alternativamente nei cilindri pompa che costituiscono il corpo della pompa. Da qui viene spinto attraverso una valvola di erogazione interna, senza contatto con gli organi meccanici posti sulla superficie. L'impianto è costituito da:

- a: corpo pompa, generalmente formato da 3 cilindri senza meccanismi interni rotanti a parte l'aspirazione in gomma e le valvole di mandata. La pompa può essere equipaggiata con tubi di ingresso o con pale disagreganti e livellanti;

³PNEUMA SYSTEM, Pneuma s.r.l. - Firenze (IT), <http://www.pneuma.it/>

- b: distributore, che regola l'afflusso e lo scarico di aria compressa da e per ciascun cilindro del corpo pompa, e che assicura il funzionamento uniforme e un flusso continuo;
- c: alimentazione d'aria, generalmente prodotta da un compressore azionato da qualsiasi tipo di motore.



Figura 5.17: Sistema di pompe Pneuma

Le principali caratteristiche delle pompe PNEUMA sono:

1. fino al 90 % di concentrazione di solido nella miscela dragata; tasso di produzione da 40 a 2000 m^3/ora ;
2. ampia gamma di profondità di dragaggio, da pochi centimetri a 200 m;
3. rimozione selettiva di strati sottili di sedimenti inquinati;
4. mancanza di coltelli rotanti, torbidità inesistenti durante le operazioni;
5. tecnologia dell'aria compressa che funziona come una pompa a pistone;
6. numerose possibilità di montaggio, su chiatte esistenti o pontoni smontabili;
7. nessun collegamento rigido, corpo pompa sospeso da un cavo d'acciaio e collegato da tubi in gomma;
8. totale conformità ai più elevati standard di agenzie governative per l'ambiente.

Il ciclo di lavoro delle pompe Pneuma può essere suddiviso in tre fasi: nella prima avviene il riempimento della pompa, ciascun cilindro è rapidamente riempito con della miscela grazie alla contropressione dovuta al battente idrostatico, eventualmente con l'aiuto di un sistema di vuoto in caso di acque poco profonde; non appena un cilindro è riempito, la valvola di alimentazione si chiude automaticamente grazie al proprio peso. Nella seconda fase si ha lo svuotamento della pompa ed il reflusso: quando il cilindro è stato riempito, l'aria compressa fornita da un compressore attraverso il tubo distributore, agisce come un pistone e la miscela viene così forzata ad uscire attraverso la valvola di mandata. Nell'ultima fase viene scaricata l'aria compressa ed il ciclo riparte con la fase uno.

5.7 Metodi per stimare la risospensione, i residui e la diffusione

Tutte le operazioni di dragaggio comportano risospensione di sedimenti, rilascio di contaminanti, e generazione di residui. Risospensione è la dispersione dei sedimenti nella colonna d'acqua in cui le particelle più fini sono soggette al trasporto da parte delle correnti. La risospensione comporta anche qualche perdita di contaminanti, a breve termine, causata dal rilascio di acqua interstiziale e dall'emissione da parte delle particelle di sedimento in sospensione. Dato che i contaminanti normalmente uniti ai sedimenti tendono a rimanere saldamente legati alle particelle di sedimento a grana fine, il controllo della risospensione, aiuterà anche nel controllo del rilascio di contaminanti. La maggior parte dei sedimenti risospesi si stabilisce vicino alla draga entro un'ora di tempo, e solo una piccola parte richiede più tempo per ristabilirsi. Tuttavia, le particelle fini con velocità critiche di sedimentazione inferiori alle locali velocità indotte dalla turbolenza, sono soggette a trasporto per ore e giorni prima di stabilirsi, quindi queste, se rimesse in sospensione, costituiscono un rilascio di contaminanti potenzialmente significativo su una vasta area.

I residui sono definiti come sedimenti staccati, ma non rimossi dal dragaggio, che ricadono o si depositano in prossimità della zona di dragaggio per formare un nuovo strato di sedimenti (Figura 21). Essi contribuiscono a breve termine al rilascio di contaminanti. Il funzionamento reale della draga può avere un impatto significativo sui residui e sulla risospensione: questioni come l'eccessivo riempimento delle secchie, l'aumento della velocità delle stesse quando toccano il fondo e la velocità della benna durante il sollevamento, possono avere un impatto significativo sulla risospensione e sui residui. Vengono qui presi in considerazione alcuni modelli di risospensione e di residui, specifici per operazioni di dragaggio e relativamente recenti, mentre esistono modelli ben sviluppati di trasporto per la previsione della qualità delle acque e la tossicità.

5.7.1 Risospensione dei sedimenti

Il grado di risospensione è funzione di una serie di fattori che includono:

- le proprietà del sedimento come la densità in situ, il contenuto organico, la distribuzione granulometrica, e la mineralogia;
- le condizioni del sito, quali profondità dell'acqua, le correnti, le onde, e la presenza di roccia;
- la natura e l'estensione degli ostacoli, come ad esempio detriti, ciottoli sciolti e massi;
- considerazioni operative quali lo spessore dei tagli della draga, il tipo di apparecchiatura di dragaggio, il metodo di funzionamento, e l'abilità dell'operatore.

Sono stati pubblicati dati di sedimenti in sospensione per le specifiche operazioni di dragaggio, e sono stati sviluppati alcuni metodi per la stima del rilascio; tuttavia, i dati disponibili non coprono una gamma sufficiente di sedimenti e di condizioni ambientali e operative per servire come base per la previsione delle diverse operazioni di dragaggio. Tecniche predittive sviluppate da Nakai (1978), Collins (1995), e Hayes et al. (2000) si applicano solo ad un insieme relativamente

ristretto di condizioni. Pertanto, il miglior approccio predittivo attualmente disponibile è quello di affidarsi alle misure passate, considerandole come una traccia su cui sviluppare un fattore di risospensione che può essere adeguato per le proprietà specifiche dei sedimenti, delle condizioni del sito, e delle tecniche di dragaggio. Il fattore di risospensione è definito come la frazione del materiale a grana fine che viene dispersa nella colonna d'acqua.

Nakai (1978) ha monitorato 10 operazioni di dragaggio di manutenzione, notando che i fattori di risospensione stimati variavano dallo 0.02 % al 3.93 %; il fattore di risospensione medio per queste operazioni era pari al 1.2 %. Hayes e Wu (2001) e Hayes e (2000) hanno evidenziato fattori di risospensione per cinque operazioni di dragaggio di manutenzione osservando che la media variava dallo 0.003 % allo 0.13 %, e che il fattore di risospensione massimo relativo alle 400 osservazioni era dello 0.51 %. Ancora, Pennekamp et al. (1996) ha monitorato 12 dragaggi di manutenzione di tipo meccanico ed i fattori di risospensione stimati variavano dallo 0.3 % a 1 % per benne aperte, dallo 0.3 % al 2 % per benne chiuse, dallo 0.6 % al 5 % per escavatori, e dallo 0.3 % al 2 % per le draghe a secchie; il fattore medio di risospensione era circa 1.5 %.

La gamma di fattori di risospensione dimostra che non si può riscontrare un tipico fattore di risospensione. Tuttavia, sulla base di questo insieme di dati, Hayes ha stimato che la caratteristica conservativa del fattore di risospensione per draghe a testa tagliente è di circa 0,5 % della frazione di limo e argilla, mentre quella per draghe meccaniche è di circa l'1 %. Le più moderne draghe ambientali lavorano meglio rispetto a quelle riportate in letteratura da Pennekamp e Nakai, pertanto la caratteristica conservativa del fattore di risospensione è di circa 0,5 %. Questi fattori caratteristici di risospensione riflettono la tendenza centrale (media e mediana) dei dati empirici e rappresentano la risospensione caratteristica del sito, dei sedimenti, e dei parametri di funzionamento.

Il fattore di risospensione dovrebbe aumentare con la liquidità del sedimento, proprietà geotecnica legata al contenuto d'acqua e ai limiti Atterberg come segue:

$$LI = \frac{W - PL}{LL - PL} \text{ o } LI = \frac{W - PL}{PI} \quad (5.1)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} LI = \text{indice di liquidità} \\ W = \text{contenuto d'acqua percentuale} \\ PL = \text{limite di plasticità percentuale} \\ LL = \text{limite liquido percentuale} \\ PI = \text{indice plastico percentuale} \end{array} \right.$$

I sedimenti molto densi si risolleivano più facilmente. La liquidità incorpora numerose proprietà dei sedimenti: aumenta con la diminuzione della densità o con l'aumento del contenuto d'acqua, della porosità, o del rapporto di vuoti. Essa aumenta anche con la granulometria per materiale fine o con la diminuzione del contenuto di argilla. Anche gli incrementi di corrente e di energia delle onde dovrebbero aumentare il fattore di risospensione: forti correnti sono in grado di disperdere i sedimenti sospesi nella colonna d'acqua; l'impatto dovrebbe essere maggiore per il dragaggio meccanico, in particolare con secchi aperti. Analogamente, aumenti di profondità aumentano la risospensione da dragaggio meccanico e gli effetti sono maggiori per i sedimenti con maggiore liquidità.

Un aumento di impedimenti al dragaggio quali detriti, ciottoli, massi e affioramenti di roccia si traduce in un aumento della risospensione. Di questi impedimenti,

i detriti rappresentano il problema più grande perché possono impedire la chiusura della benna, causando perdite significative di materiale dragato.

Velocità elevate della benna possono erodere il letto di sedimenti e aumentare la risospensione; l'eccessivo riempimento delle secchie o un'eccessiva profondità di taglio può causare il rilascio di sedimenti dalle bocchette della benna durante la penetrazione, portando ad un aumento della risospensione. Infine, anche il trasporto su chiatte può contribuire a questo problema, che può essere controllato però da apparecchiature di selezione e da una corretta gestione del sito.

Metodo TGU di Nakai

Il metodo più datato e comunemente utilizzato per prevedere i tassi di risospensione da dragaggio è stato pubblicato da Nakai nel 1978 ed è noto come il metodo TGU (Turbidity Generation Unit): uno strumento implementato per draghe a benna aperta, a testa tagliente e a tramoggia. I dati che il modello richiede sono le velocità di sedimentazione, le velocità turbolente nella colonna d'acqua, la distribuzione dello sforzo di taglio nella colonna d'acqua, e lo sforzo di taglio critico per la sedimentazione. Questi elementi non sono stati misurati nei siti e sono in gran parte sconosciuti nei siti di dragaggio. Nakai presume che tutte le particelle superiori a 5 micron si depositano, secondo la sua tabella di valori, ma recenti misure hanno dimostrato che le sue valutazioni sono notevolmente sovrastimate e ciò rende improbabile l'utilizzo del metodo

Modello di Collins per contenitori aperti

Il modello assume che il sedimento viene risospeso nel volume di colonna d'acqua durante la frazione del ciclo di dragaggio quando la benna risale dal fondo verso la superficie dell'acqua. Quando la benna affiora, la concentrazione nel volume, ipotizzato cilindrico, è assunta uniforme. Questa concentrazione di sedimenti si riduce progressivamente in modo lineare quando la benna scende nuovamente dalla superficie libera al fondo. Quando la benna raggiunge il fondo del canale, si presume che l'intera massa di sedimenti in sospensione nella colonna d'acqua è stata eliminata e l'apporto di sedimenti al volume vicino è mediato sulla durata dell'intero ciclo di dragaggio. Un tasso di perdita per risospensione è stato valutato per contenitori o benne di tipo aperto (clamshells):

$$R = \frac{2(\rho \cdot 10^{-6})hb^5(1 + k_{cb})^2}{v_s^3 T^4 (f_u + 2f_o + f_d)} \quad (5.2)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \text{tasso di sedimenti risospesi a causa del dragaggio (g/m}^3\text{)} \\ \rho = \text{densità di massa secca (g/cm}^3\text{)} \\ h = \text{profondità di dragaggio (m)} \\ b = \text{dimensione rappresentativa del secchio (m)} \\ k_{cb} = \text{costante empirica secchio (1)} \\ v_s = \text{velocità di sedimentazione di Stokes (m/s)} \\ T = \text{tempo di ciclo di dragaggio (s)} \\ f_u = \text{frazione del ciclo di dragaggio in cui il secchio risale} \\ f_o = \text{frazione del ciclo di dragaggio in cui il secchio è fuori acqua} \\ f_d = \text{frazione del ciclo di dragaggio in cui il secchio scende} \end{array} \right.$$

Collins ha concluso che esiste una correlazione ragionevole tra le concentrazioni osservate nel volume d'origine e quelle modellate, tuttavia, è stato anche valutato che questo modello risulta abbastanza rudimentale e che dovrebbero essere effettuate modellazioni più complesse per verificarlo.

Metodo di Hayes

Hayes et al. (2000) hanno sviluppato un modello dimensionale e adimensionale per stimare il fattore di risospensione di sedimenti dovuto alle operazioni di dragaggio. La base fondamentale per entrambi i modelli segue l'ipotesi di Hayes: la maggior parte di sedimenti risospesi durante le operazioni di dragaggio nella testa tagliente è dovuta all'eliminazione di grana fine che aderisce alle lame taglienti.

Le osservazioni da più di 100 siti di dragaggio hanno prodotto dei parametri utilizzati per elaborare il modello, vale a dire:

- tasso di sedimenti sospesi per taglio portati via dalla draga \dot{m}_R ;
- tasso di sedimenti in situ tagliato dalla draga \dot{m}_S ;
- tasso di rimozione dei sedimenti da parte della draga \dot{m}_p ;
- velocità di rotazione della punta fresa V_s ;
- velocità tangenziale delle lame V_t ;
- velocità di aspirazione sulle lame V_i ;
- superficie totale delle lame esposte al lavaggio A_E ;
- superficie totale della lama A_C ;

Modello dimensionale

$$\dot{m}_R = 10^{5.666} V_t^{1.864} \left(\frac{A_E}{A_C} \right)^{14.143} \quad (5.3)$$

Modello adimensionale

$$\dot{m}_R = \frac{C_s t_c d_c^{1.966} V_s^{2.804} A_E^{1.804} |V_s \pm d_c \pi \alpha|^{1.966}}{30.5 Q^{3.77}} \quad (5.4)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_s = \text{concentrazione dei sedimenti in situ (g/L)} \\ t_c = \text{profondità di taglio per ogni passaggio (m)} \\ d_c = \text{diametro della fresa (m)} \\ L_c = \text{lunghezza lama (m)} \\ \alpha = \text{velocità di rotazione fresa (RPS)} \\ Q = \text{volume da dragare (m}^3/\text{s)} \end{array} \right.$$

Perdita percentuale Il sedimento risospeso come percentuale del totale del materiale dragato, in termini di parametri di funzionamento è, per modello dimensionale e adimensionale rispettivamente:

$$\hat{g} = \frac{|V_s \pm d_c \pi \alpha|^{1.864}}{27.4 C_s V_s t_c L_c^{15.143}} \left(\frac{A_E}{A_C} \right)^{14.143} \quad (5.5)$$

$$\hat{g} = \frac{(L_c d_c)^{1.966} |V_s \pm d_c \pi \alpha|^{1.966} (V_s A_E)^{1.804}}{1.099 Q^{3.77}} \quad (5.6)$$

I modelli sono più applicabili in contesti simili a quelli usati per il loro sviluppo e dovrebbero essere applicati solo per draghe all'interno della gamma di caratteristiche di funzionamento utilizzate nelle osservazioni.

Modello di dragaggio USACE

DREDGE (Hayes e Je 2000) è un modello di selezione per l'analisi della risospensione del rilascio di contaminanti: la dispersione è assunta gaussiana e la sedimentazione sulla base della teoria di Stokes in un campo di flusso uniforme. *DREDGE* stima il tasso di massa con cui i sedimenti del fondo vengono rilasciati in sospensione nella colonna d'acqua, come risultato delle operazioni di dragaggio idraulico e meccanico e calcola la conseguente concentrazione di sedimenti sospesi e di agenti contaminanti.

5.7.2 Residui

Uno dei limiti più significativi attualmente associati alla valutazione dell'efficacia di un dragaggio ambientale è l'incertezza legata alla stima della natura e dell'estensione della contaminazione successiva alla rimozione dei residui. Nessuna tecnologia di rimozione può eliminare completamente ogni particella di materiale contaminato e i risultati fino ad oggi ottenuti suggeriscono che i livelli di contaminazione da residui nel post dragaggio sono spesso non soddisfacenti, sulla base dei livelli di pulizia desiderati, tuttavia, va notato che molti progetti sono stati completati utilizzando apparecchiature di navigazione normali e senza il beneficio di sistemi di posizionamento GPS o RTK.

I residui possono essere generalmente raggruppati in due categorie: residui indisturbati e residui generati: i primi sono sedimenti contaminati presenti nella superficie dragata che sono stati scoperti dal dragaggio, ma non completamente rimossi, mentre i secondi sono sedimenti contaminati che vengono rimossi o sospesi dall'operazione di dragaggio e successivamente ridepositati sul fondo. È importante distinguere la differenza tra le due classi, in quanto possono comportare rischi diversi, richiedono diversi metodi di predizione, monitoraggio e gestione dei risultati. In funzione del rischio posto da tali materiali e dell'approccio normativo per la pulizia in un particolare sito, i residui che possono accumularsi all'esterno dell'impronta di dragaggio possono innescare o meno una necessità di gestirli attivamente.

Comprendere i residui in un certo numero di fasi differenti del processo di bonifica è importante e possono essere necessari approcci alquanto diversi in ogni fase.

Il livello di preoccupazione per i residui presenti dipende da molti fattori, tra cui:

- le concentrazioni dei contaminanti di interesse (COC);

- il tempo di permanenza dello strato di sedimento con residui;
- lo spessore dello strato di sedimento con residui;
- la densità a secco;
- la variabilità dei COC;
- la mobilità;

Normalmente per la rimozione di residui contaminanti, i progetti prevedono più passaggi della draga per raggiungere gli obiettivi: con i primi passaggi ci si concentra sulla rimozione di massa per poi completare la bonifica con ulteriori passaggi finali. Rimuovere la maggior parte del materiale in più passate che non superano 1 ÷ 1.5 metri permette di limitare la contaminazione in aree adiacenti (vedi figura 5.18)

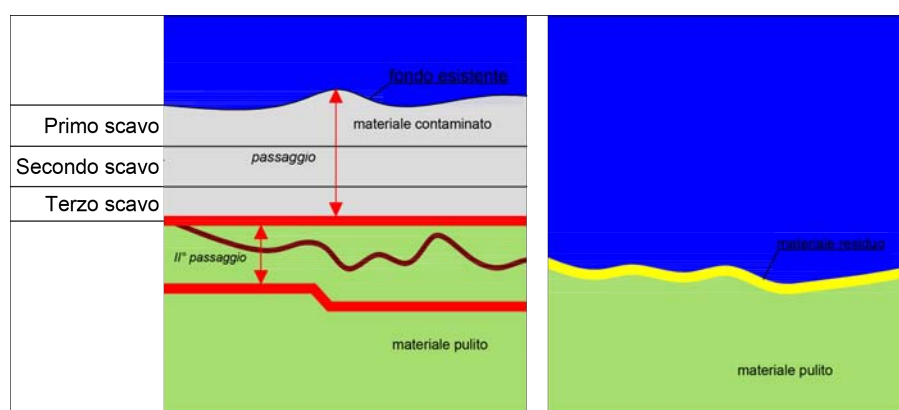


Figura 5.18: Passaggi multipli della draga per la rimozione dei residui

I residui indisturbati e generati possono avere caratteristiche simili o molto diverse a seconda del processo attraverso il quale vengono creati. Per esempio, i sedimenti smossi dalla draga ma non raccolti generalmente ricadono sul fondo in una zona relativamente vicina al punto di dragaggio e possono avere in questo caso caratteristiche simili a quelle dei residui indisturbati. I sedimenti risospesi invece, che si depositano sul fondo possono avere caratteristiche molto diverse dal sedimento indisturbato. In generale, i residui indisturbati rimangono al di sotto del taglio della draga con una densità secca superiore a quella dei residui generati; la loro densità di massa secca sarebbe simile a quella dei sedimenti in situ. In alcuni casi, residui indisturbati possono consistere in strati relativamente spessi suscettibili di ulteriori passaggi di pulizia. Viceversa, i residui generati sono il risultato del processo di dragaggio stesso, e tali materiali si accumulano all'interfaccia sedimento/acqua in strati sottili e con una bassa densità. I risultati ottenuti su progetti pilota di dragaggio ambientale già completati suggeriscono che ci sono caratteristiche geotecniche e geochemiche comuni nei residui. Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche e geotecniche i residui generati sono più inclini alla risospensione subito dopo il dragaggio e dopo il periodo di consolidamento iniziale (entro un periodo che va dai giorni a qualche settimana, a seconda delle caratteristiche dei sedimenti e del sito), essi si presentano come una patina sottile di materiale a grana fine con spessore da 1 a 10 cm e con una densità di circa $0.2 \div 0.5 \text{ g/cm}^3$; queste caratteristiche cambiano in modo significativo subito dopo il completamento del dragaggio. Viceversa, le caratteristiche fisiche e geotecniche dei residui indisturbati non si modificano sensibilmente dopo il dragaggio.

Dal punto di vista geo-chimico, i dati esistenti suggeriscono che la concentrazione media di COC nei residui generati può essere ragionevolmente approssimata sulla base della concentrazione media ponderata dei sedimenti nella fase finale dello scavo.

Stima dei residui

La quantità e la qualità dei residui post-dragaggio dipende dall'equipaggiamento di dragaggio, i metodi, le caratteristiche dei sedimenti e le condizioni del sito. Tuttavia, non esiste attualmente alcun metodo comunemente accettato per prevedere con precisione le concentrazioni di agenti contaminanti nei residui generati post-dragaggio. I dati ottenuti sui residui da Patmont (2006) relativi a 12 progetti di dragaggio ambientale completati tra il 1999 e il 2005, hanno permesso di stabilire che i residui contenevano dal 5 al 9 % della massa dei contaminanti rimossi da otto dei dodici siti contenenti PCB (policlorobifenili⁴). Gli altri quattro siti, che avevano contaminanti più mobili, presentavano residui che vanno con una percentuale dal 2 al 4 % della massa contaminante rimossa. Viste le osservazioni sul campo, Hayes e Patmont (2004) invitano alla stima della concentrazione di contaminanti nei residui in modo tale che sia uguale alla concentrazione di inquinanti alla profondità mediata dei sedimenti rimossi nell'ultima passata.

5.7.3 Rilascio di contaminanti

Perdite di contaminanti associati alle operazioni di dragaggio possono verificarsi in particolato, in frazioni disciolte o volatili, ciascuna caratterizzata da una modalità diversa di trasporto e/o assorbimento. Alcune particelle fini di sedimento hanno basse velocità di sedimentazione e possono rimanere sospese nella colonna d'acqua per ore o giorni, e le particelle di sedimenti in sospensione ed i contaminanti associati vengono trasportati attraverso le correnti dall'area di dragaggio nell'ambiente circostante. Inoltre, anche la risospensione dei sedimenti comporterà il rilascio di contaminanti nella fase disciolta nella colonna d'acqua, a causa della presenza di contaminanti nell'acqua interstiziale dei sedimenti e nelle particelle in sospensione.

Mentre ci si aspetta che le esposizioni ed i rischi associati al rilascio di contaminanti disciolti siano più brevi di quelli relativi ai sedimenti del fondo, la grandezza e la durata di tali rischi dipenderanno da una serie di fattori che includono la lunghezza del dragaggio e una serie di altri fattori fisici e chimici. Questi contaminanti disciolti potranno interagire con gli altri solidi e materiali presenti al di fuori della zona di dragaggio, subire reazioni, essere dispersi e incorporati nell'ecosistema locale, e/o essere trasportati per una certa distanza. Anche il rilascio nell'aria attraverso la volatilizzazione può essere una preoccupazione; inoltre, gli olii galleggianti che vengono talvolta rilasciati nella colonna d'acqua durante il processo di dragaggio, forniscono un'altra strada che facilita il trasporto dei contaminanti. Fortunatamente, i contaminanti normalmente associati ai sedimenti tendono a rimanere saldamente legati alle particelle a grana fine, pertanto il controllo di risospensione aiuta anche nel controllo del rilascio di inquinanti. Misurare la

⁴noti spesso con la sigla PCB, sono una classe di composti organici caratterizzati da una bassa solubilità in acqua e da una bassa volatilità. Sono inoltre tutti molto solubili in sostanze idrofobe come oli e grassi; molto stabili, che possono essere distrutte solo per incenerimento o attraverso processi catalitici. Il loro utilizzo è andato declinando dagli anni settanta, a causa dell'allarme ambientale sorto attorno ad essi che ha portato al bando della loro produzione in numerose nazioni

variabilità delle concentrazioni di agenti contaminanti nel tempo e nello spazio è difficile e costoso ed esistono poche fonti contenenti dati sulle emissioni e sul rilascio di inquinanti, di conseguenza, le previsioni sono in larga misura teoriche o basate su misure di laboratorio come il test *DRET*.

Perdite di contaminanti si verificano anche con i residui, sia durante che dopo l'operazione di dragaggio e risultano dal consolidamento dello strato di tale materiale, espellendo l'acqua interstiziale con i contaminanti disciolti. I residui possono avere concentrazioni di solidi molto basse quando sono di recente formazione e possono continuamente rilasciare grandi quantità di acqua contaminata durante le operazioni, difficilmente distinguibile dalle perdite per risospensione. Essi possono anche essere erosi durante il dragaggio; perdite di contaminanti di questo tipo possono superare le perdite da risospensione. I residui forniscono la stessa fonte di rischio che dà il letto di sedimenti originale, ma con un'entità che dipenderà dalla concentrazione di contaminante e dallo spessore del loro strato.

Emissioni contaminanti di particolato da risospensione

La risospensione delle particelle è funzione del tipo e del funzionamento della draga nonché delle proprietà dei sedimenti, i quali, in generale, meno coesivi sono, maggior potenziale di risospensione manifestano. I contaminanti associati alle particelle rimesse in sospensione sono in primo luogo metalli, altre specie elementari e contaminanti organici.

Il rilascio di massa di un contaminante durante il dragaggio è definito da:

$$m = f_r \rho_s A D C_s \quad (5.7)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} m = \text{massa inquinante (g)} \\ f_r = \text{frazione del sedimento risospeso nel dragaggio (adimensionale)} \\ \rho_s = \text{densità di massa del sedimento in situ (g/cm}^3\text{)} \\ A = \text{area di dragaggio disponibile per il trasferimento di massa (cm}^2\text{)} \\ D = \text{profondità di dragaggio (cm)} \\ C_s = \text{concentrazione di contaminanti nei sedimenti, peso secco (g/g)} \end{array} \right.$$

L'equazione 5.7 è utile come definizione, ma non come equazione utile per la previsione, poiché la frazione di sedimento risospeso è difficile da stimare ed il rilascio di massa è più convenientemente espressa su base percentuale. Per avere il tasso di rilascio di massa, l'area di dragaggio A è sostituita con A_d , area di dragaggio per unità di tempo (cm^2/s) ed m diventa R_D , massa di contaminante rilasciato per unità di tempo (g/s). In alternativa, se è nota una concentrazione di solido risospeso mediata nella colonna d'acqua, il tasso di risospensione contaminante R_D è dato da:

$$R_D = C_p Q_d C_s \quad (5.8)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_D = \text{tasso di rilascio di contaminante del particolato - associato (g/s)} \\ C_p = \text{concentrazione di solidi sospesi mediata sul volume (g/cm}^3\text{)} \\ Q_d = \text{portata volumetrica (cm}^3\text{/s)} \end{array} \right.$$

Il tasso di rilascio di contaminanti definito nell'equazione 5.8 è basato sulla concentrazione totale di contaminante iniziale nei sedimenti in situ e, pertanto, comprende sia il particolato che le frazioni disciolte. In questo modo la stima del tasso di rilascio da risospensione per unità di tempo viene ridotta ad una stima della frazione di particelle che sono risospese.

Rilascio di contaminanti disciolti da risospensione

La risospensione dei sedimenti solidi durante il dragaggio può colpire anche la qualità dell'acqua attraverso il rilascio di contaminanti in forma disciolta. Prima della risospensione, la distribuzione dei contaminanti tra i sedimenti solidi e l'acqua interstiziale è in equilibrio: il dragaggio espone i sedimenti a importanti cambiamenti nel rapporto liquidi/solidi e nel potenziale di ossidazione-riduzione. Poiché i sedimenti solidi vengono rimossi dalle condizioni di equilibrio, c'è la possibilità di una modifica nella distribuzione di inquinante tra le fasi solida e liquida. Subito dopo la risospensione, la maggior parte dei contaminanti sono legati al particolato; poiché la concentrazione del particolato risospeso è diluita con l'acqua di dragaggio, il rilascio dei contaminanti assorbiti nelle acque adiacenti comporta un continuo aumento della frazione disciolta. La frazione del contaminante associato al particolato continua a cambiare, mentre la diluizione, che avviene in meno di un'ora nella maggior parte dei sistemi, riduce la concentrazione. Tuttavia, possono essere necessari giorni affinché le particelle contaminate con prodotti organici idrofobi realizzino un nuovo equilibrio con la colonna d'acqua, tempo che è spesso più lungo dell'assestamento per le particelle stesse.

L'indicatore di previsione più accurato per lo studio del rilascio di contaminanti disciolti durante il dragaggio sarebbe una prova di laboratorio completamente sviluppata e verificata, in grado di riprodurre i processi di miscelazione e diluizione che si osservano nella colonna d'acqua dopo la risospensione dei sedimenti contaminati; il test *Dret* è stato sviluppato per questi scopi.

In assenza di informazioni specifiche, è opportuno utilizzare l'equilibrio di ripartizione⁵ per stabilire un limite superiore di concentrazioni organiche disciolte presso il punto di dragaggio, anche se è un'ipotesi molto conservativa.

Utilizzando l'equilibrio di ripartizione locale, la concentrazione disciolta è data da:

$$C_w = \frac{C_s C_p}{K_d C_p + 1} \quad (5.9)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_w = \text{concentrazione disciolta di contaminante (mg/L)} \\ C_s = \text{concentrazione di massa contaminante nei sedimenti (mg/kg)} \\ C_p = \text{concentrazione di solidi sospesi mediata sul volume} \\ \quad \text{nel punto di dragaggio (kg/L)} \\ K_d = \text{coefficiente di ripartizione per lo specifico contaminante (L/kg)} \end{array} \right.$$

Il coefficiente di ripartizione nell'equazione 5.9 può essere determinato tramite analisi di laboratorio, relazioni empiriche date in letteratura, o calcolato dai risultati del test *DRET*.

⁵è un caso speciale di equilibrio chimico. L'equilibrio chimico coinvolge reagenti e prodotti con la stessa fase; è possibile però ottenere un equilibrio tra sostanze in fasi diverse, come due liquidi non miscibili. Tale equilibrio è espresso dalla legge di Nernst

Il tasso di rilascio di contaminanti disciolti è il prodotto della concentrazione di contaminanti disciolti mediata sul volume dragato e sulla portata volumetrica. Tale tasso, per una draga fa testa tagliante, è quindi dato da:

$$R_{d,ch} = C_w V_t \alpha H_{ch} \beta L_{ch} \quad (5.10)$$

dove:

$$\begin{cases} \alpha H_{ch} \beta L_{ch} = \text{sezione trasversale effettiva della testa di taglio} \\ H_{ch} = \text{altezza testa di taglio} \\ L_{ch} = \text{lunghezza testa di taglio} \end{cases}$$

α e β tengono conto del fatto che l'area movimentata è tipicamente maggiore della testa tagliante e valgono:

$$\begin{cases} \alpha = 1.75 \\ \beta = 1.25 \end{cases}$$

Analogamente, il tasso di rilascio di contaminanti disciolti per una draga a benna mordente è dato da:

$$R_{d,b} = \gamma \rho_w (L_{bc})^2 \frac{h_b}{\tau_{cb}} C_w \quad (5.11)$$

dove:

$$\begin{cases} \gamma = \text{fattore di correzione di Bohlen per l'area movimentata (2 ÷ 4)} \\ \rho_w = \text{densità dell'acqua (g/cm}^3\text{)} \\ h_b = \text{profondità (cm)} \\ \tau_{cb} = \text{tempo di ciclo della benna (s)} \end{cases}$$

Diverse limitazioni riguardano le equazioni 5.10 e 5.11; in primo luogo, i dati sperimentali per verificarle sono molto limitati e poi non sono applicabili alla stima del rilascio di metalli disciolti a meno che non si ricorra ai risultati del test *Dret*. Inoltre esse prevedono le concentrazioni disciolte nel punto di dragaggio (la fonte) e non quelle più a valle, dove servono modelli di trasporto.

Rilascio di contaminanti disciolti da residui

Oltre alla risospensione come fonte primaria di contaminanti, c'è una serie ulteriore di fonti di rilascio di inquinanti che può essere degna di considerazione, ed include:

- rilascio di contaminanti disciolti e di solidi dispersi, dalla densificazione di uno strato sul fondo ad alta concentrazione di solidi, compresi fanghi liquidi e residui;
- diffusione molecolare dalla faccia di taglio e dai residui di dragaggio;
- avvezione acque sotterranee;
- esposizione di liquidi in fase non acquosa (NAPL⁶).

Ad eccezione dell'ultima, queste fonti di rilascio aggiuntive hanno il potenziale di essere significative dove i contaminanti hanno basse caratteristiche di ripartizione o dove l'estensione dei residui è grande in confronto alla zona di dragaggio.

⁶liquidi che non si mescolano con l'acqua

DRET test

Lo *standard elutriate test* sviluppato congiuntamente dall'EPA e l'US Army Corps of Engineers nei primi anni settanta, ha previsto in maniera soddisfacente l'entità della contaminazione tossica quando il materiale inquinato viene riversato in discariche sottomarine. Inoltre, sulla base dell'analisi dei dati forniti per un'altra indagine, si è dimostrato che il test ha previsto, entro un ordine di grandezza, il rilascio di contaminanti nel punto di dragaggio, (Ludwig e Sherrard 1988).

Nel 1995 è stato proposto un adattamento del *standard elutriate test*, il cosiddetto *DRET*, che rimane è l'unico test disponibile per analizzare il funzionamento specifico del rilascio di contaminanti. Le modifiche apportate prevedevano di ottenere un rapporto acqua/solido da 0.5 a 10 g/l, coerente con le condizioni per i sedimenti risospesi a causa del dragaggio, e tempi di miscelazione e assestamento pari rispettivamente a 1 ÷ 6 ore e 1 ora. La concentrazione di prova dei sedimenti dovrebbe essere:

$$C_{test} = \frac{TSS}{f_{74}} \quad (5.12)$$

dove:

$$\begin{cases} C_{test} = \text{concentrazione di sedimento secco (g/l)} \\ TSS = \text{concentrazione target di risospensione per solidi sospesi (g/l)} \\ f_{74} = \text{frazione della massa di sedimento con granulometria} < 74 \mu\text{m} \end{cases}$$

Quando si stima il rilascio da risospensione e residui, deve essere utilizzata nel test una concentrazione di sedimento più alta per tenere conto del rilascio di acqua durante la densificazione da parte dei residui. Quindi, la concentrazione di prova può essere calcolata come segue:

$$C_{test} = \frac{TSS}{f_{74}} \left(1 + \frac{\% \text{ Residuals}}{\% \text{ Resuspension}} \right) \quad (5.13)$$

dove:

$$\begin{cases} \% \text{ Residuals} = \text{percentuale di massa di sedimento nei residui fluidi} \\ \% \text{ Resuspension} = \text{percentuale risospesa} \end{cases}$$

I risultati del test forniscono una stima delle concentrazioni di contaminanti nelle vicinanze della testa di taglio o del secchio, inoltre, possono fornire una stima del coefficiente di ripartizione, che può essere calcolato come segue:

$$K_d = \frac{(C_s C_{test}) - C_w}{C_w C_{test}} \quad (5.14)$$

dove:

$$\begin{cases} K_d = \text{coefficiente di distribuzione per il contaminante specifico (l/kg)} \\ C_s = \text{concentrazione di massa dei contaminanti nei sedimenti (mg/kg)} \\ C_{test} = \text{concentrazione dei solidi nella prova (kg/l)} \\ C_w = \text{concentrazione di contaminanti disciolti nella fase acquosa (mg/l)} \end{cases}$$

5.8 Metodi di controllo

Deve essere fatta in questo contesto una distinzione tra controlli di tipo operativo e quelli di tipo progettuale. I primi includono le azioni che possono essere intraprese dall'operatore della draga per ridurre gli impatti del dragaggio, mentre i secondi richiedono certe tecnologie di costruzione. L'esecuzione dei controlli operativi dovrebbe essere basata su una chiara comprensione di come funziona la draga e delle condizioni di esercizio, non solo sulla conoscenza di ciò che è nei piani di progetto.

Applicazione di questo tipo di controlli è abbastanza costosa e in grado di ridurre in modo significativo i tassi di produzione e l'efficienza complessiva, ed inoltre, può avere impatti negativi diretti sul progetto e l'ambiente; pertanto la decisione della loro applicazione deve essere sito specifica in modo tale da impiegarli solo quando le condizioni ne indicano chiaramente il bisogno, non devono cioè essere impostati come un requisito di base per il solo fatto che possono essere applicati.

5.8.1 Misure di controllo per la risospensione

Un fattore nella scelta del tipo di draga per un progetto di dragaggio ambientale è sicuramente quello di ridurre la risospensione dei sedimenti. Tutte le draghe provocano risospensione, e in funzione degli standards specifici di prestazione per ogni progetto, potrebbe essere o meno necessaria una misura di controllo. Sulla base delle esperienze ottenute fino ad oggi, appare appropriato in molti casi un approccio a più livelli per l'attuazione del controllo della risospensione; tali livelli possono includere:

- un monitoraggio più intensivo;
- l'esecuzione di controlli operativi e/o progettuali;
- la cessazione delle operazioni di dragaggio (nei casi più estremi).

Misure di controllo operative

Questo tipo di controlli può includere cambiamenti nei metodi di dragaggio e/o nel funzionamento delle apparecchiature, come ad esempio:

- la riduzione del tasso di dragaggio per rallentare le operazioni, particolarmente importante per contenere la velocità della benna in fase di avvicinamento al fondale e per la successiva risalita verso la superficie libera;
- la riduzione della penetrazione della benna, che può causare l'espulsione dei sedimenti dalla stessa;
- l'eliminazione di materiale in eccesso dalle chiatte durante il dragaggio o il trasporto;
- modifica del funzionamento della draga, basato sul cambiamento delle condizioni del sito come le maree, le onde, le correnti, ed il vento;
- modifica della profondità della testa tagliente, della sua velocità di rotazione e di quella di avanzamento della draga;
- utilizzo di una vasca di risciacquo per la pulizia della benna ad ogni ciclo;

- variazione del numero di passate (tagli verticali) per aumentare la quantità di sedimenti dragati;

Oltre ai controlli posti sul funzionamento delle attrezzature di base, possono essere considerate, per il dragaggio meccanico, altre misure di controllo operativo, che includono l'uso di vassoi o piastre sommerse per contenere la perdita dai secchi/benne e l'uso di vasche di lavaggio per rimuovere i sedimenti che aderiscono ai secchi prima dell'inizio del ciclo successivo.

Misure di controllo progettuali

Il trasporto di sedimenti contaminati risospesi durante il dragaggio può essere ridotto usando barriere fisiche intorno all'area dei lavori; queste aiutano a limitare l'estensione della migrazione dei contaminanti e a valorizzare, a lungo termine, i benefici ottenuti dal processo di rimozione. Viceversa, poiché le barriere contengono sedimenti risospesi, possono aumentare, almeno temporaneamente, le concentrazioni di inquinanti residui al loro interno. Alcuni esempi di barriere possono essere:

- Cofferdams;



(a)



(b)

Figura 5.19: Esempi di cofferdam

- Dighe rimovibili (geotubi);



(a)



(b)

Figura 5.20: Esempi di geotubi

- Palancole;
- Silt curtains/Silt screens;



Figura 5.21: Esempi di palancole



Figura 5.22: Esempi di silt curtains/screens

- Pneumatic curtains.

Cofferdam e dighe rimovibili sono in genere utilizzati per scavi a secco, mentre gli altri tipi di contenimento sedimenti risospesi sono propri delle operazioni di dragaggio.

Silt curtains/screens

Silt curtains/screens rappresentano forse il sistema di controllo di risospensione più utilizzato; sono costituiti da barriere flessibili adagiate sull'acqua, dotate di una serie di galleggianti sulla superficie e di una catena di ancore/zavorre sul fondo. Anche se i due termini sono utilizzati come sinonimi, ci sono fondamentali differenze: i *silt curtains* sono fatti di materiale resistente come nylon rivestito, e in primo luogo indirizzano tutta la corrente attorno alla zona chiusa; i *silt screens* invece sono schermi realizzati con geotessili sintetici, che permettono il deflusso dell'acqua mantenendo una frazione dei solidi sospesi all'interno dell'area schermata. I primi possono essere appropriati quando le condizioni del sito garantiscono un trasporto minimo di sedimenti sospesi, per esempio quando si dragano zone ad alta concentrazione di contaminanti.

Un sistema di controllo come i *silt curtains* non tratta la torbidità risultante dalla risospensione dei sedimenti; a seconda della conformazione della difesa, esso si limita a contenere o a dirigere il movimento dei sedimenti. Una protezione parziale normalmente si estende dalla superficie ad una profondità impostata, ed agisce per contenere i sedimenti e per ridurre la diffusione nella colonna d'acqua superiore, tuttavia, il materiale è libero di muoversi al di sotto. Una protezione completa invece contiene, previene la diffusione e limita ulteriormente il movimento dei

sedimenti risospesi. Tuttavia, possono esserci fuoriuscite anche da protezioni complete a causa di guarnizioni inefficaci lungo il fondo o a causa delle fluttuazioni delle maree e del movimento prodotto dalle navi. Gran parte dell'esperienza con questi sistemi deriva dal loro utilizzo su progetti di dragaggio di navigazione, ma questa esperienza è direttamente applicabile al dragaggio ambientale. Alcune linee guida per la selezione, progettazione ed utilizzo di *silt curtains* possono essere:

- poche applicazioni sono uguali, ognuna ha caratteristiche uniche che richiedono un adattamento specifico;
- non sono molto efficaci se la velocità della corrente è maggiore a 1.5 nodi (0.8 m/s);
- l'efficacia è influenzata dalla quantità e dal tipo di solidi sospesi, dal metodo di ormeggio e dalle caratteristiche della protezione;
- devono rimanere in vigore fino al completamento del dragaggio, consentire il traffico in entrata e in uscita e permettere lo spostamento della draga;
- i *silt screens* non sono una soluzione adatta ad ogni tipo di gestione; sono dispositivi temporanei che vanno selezionati solo dopo un'attenta valutazione della funzione prevista.

L'efficacia dei *silt curtains/screens* è determinata principalmente dalle condizioni idrodinamiche della zona, come le correnti ed il vento, le altezze d'onda e l'escursione dei livelli di marea. In generale, i primi sono più efficaci in acque poco profonde senza significative oscillazioni di marea, in quanto poi risulta sempre più difficile isolare l'operazione di dragaggio dall'ambiente circostante. Inoltre possono anche essere utilizzati per proteggere aree specifiche (habitat, prese d'acqua, zone turistiche) dalla contaminazione di sedimenti in sospensione.

I limiti nell'impiego di tali protezioni possono includere:

- correnti con velocità superiori a $1 \div 1.5$ nodi sono problematiche e portano soluzioni difficili e costose;
- applicazioni con velocità superiori a 3 nodi richiedono progetti e caratteristiche tecniche speciali e sono da prendere in considerazione solo per casi particolari;
- a profondità maggiori di 10-15 metri, le pressioni diventano eccessive e possono comportare un malfunzionamento dei materiali di costruzione standard.

Barriere strutturali

Le barriere strutturali, come le palancole, vengono utilizzate per lo scavo di sedimenti e, in alcuni casi (ad esempio, con correnti ad alta velocità) per anche per il dragaggio. Tali elementi devono essere considerati quando vi è la necessità di contenere dei sedimenti rimessi in sospensione che contengono contaminanti molto mobili o altamente tossici e quando una protezione tramite *silt curtains/screens* non risulta efficace. Dovrebbe essere fatta una valutazione approfondita delle caratteristiche del sito per determinare se questi tipi di barriere sono effettivamente necessarie e ciò può essere eseguito valutando i rischi posti dal rilascio anticipato di contaminanti dall'operazione di dragaggio in assenza di tali strutture, considerando

la misura e la durata previste di tali emissioni ed il potenziale di cattura e di accumulo dei sedimenti contaminati all'interno della barriera.

Queste strutture di contenimento sono più adatte a contenere in modo affidabile i sedimenti risospesi rispetto ai *silt curtains/screens*, anche se a costi significativamente più elevati e con diverse limitazioni tecnologiche: al fine di limitare i costi e i problemi al traffico marittimo, esse vengono raramente messe lontano dal prisma di dragaggio.

Qualora il livello dell'acqua subisca escursioni su un lato della parete, occorre considerare gli effetti del carico idraulico e la variazione delle spinte per non avere conseguenti problemi di sicurezza.

5.8.2 Misure di controllo per il rilascio di contaminanti

Il controllo del rilascio di contaminanti nella colonna d'acqua è direttamente collegato al contenimento della risospensione dei sedimenti; tuttavia, è anche funzione del trasporto e della rimozione di contaminanti dal corpo idrico. L'aumento dei tassi di sedimentazione comporta la diminuzione del rilascio di contaminanti disciolti, della diffusione e dei rischi a breve termine, anche se, in alcuni casi estremi, il controllo della risospensione può non essere sufficiente a controllare il rilascio di contaminanti ed i rischi che ne derivano.

Contro il potenziale rilascio di olii o altri materiali flottanti dai sedimenti, è possibile adottare delle barriere di contenimento galleggianti, costituite da una serie di elementi in schiuma sintetica racchiusi in tessuto e collegati con un cavo, eventualmente realizzati con materiali oleoassorbenti, come il polipropilene. Tuttavia, queste strutture non aiutano a trattenere la porzione solubile dei materiali flottanti (come, ad esempio, gli idrocarburi policiclici aromatici da olii) che quindi possono volatilizzare.

Contro il rilascio di particolato contaminante e di inquinanti disciolti è possibile intervenire con la progettazione di speciali involucri di contenimento che fungano da filtro: sono stati sviluppati per questo scopo dei geotessili filtranti, applicati assieme ai *silt curtains*, caratterizzati da sezioni permeabili, che agiscono come strati di filtri per trattare l'acqua che passa attraverso la zona di dragaggio. Il bypass di acqua intorno o sotto la protezione, per la sua resistenza al flusso può ridurre l'efficacia del sistema.

Ciascuno dei controlli sopra indicati dovrebbe anche fornire una certa protezione contro le emissioni di sostanze volatili, anche se in questi casi è opportuno prendere in considerazione altri accorgimenti, quali:

- modificare il cronoprogramma dei lavori in modo tale che la maggior parte dei sedimenti contaminati sia dragata in inverno (e, possibilmente nelle ore notturne), quando le minori temperature riducono la volatilizzazione;
- impiegare un sistema idraulico di dragaggio per ridurre le concentrazioni di inquinanti in superficie e in aria;
- applicare delle barriere contro la volatilizzazione;
- coprire il materiale dragato con barriere fisiche come rivestimenti in plastica o tappeti assorbenti;
- de-gassare la condotta prima dello scarico in un impianto a terra.

Durante lo scavo, e soprattutto in fase di trasporto e scarico dalla chiatta, la volatilizzazione potrebbe essere un problema molto più rilevante, dal momento che i materiali contaminati sono esposti all'aria.

5.8.3 Misure di controllo per i residui

I residui possono essere ridotti con un'accurata e precisa caratterizzazione del sito, una corretta definizione della linea di taglio, un attento e preciso posizionamento dei vari passaggi della draga, con rilievi batimetrici post-dragaggio e con una fase di pulizia finale per rimuovere tutti i sedimenti al di sopra della linea di taglio.

Gli approcci generalmente impiegati per la gestione ed il controllo dei residui sono:

- **passaggio di rifinitura** - In alcuni siti, vengono eseguiti dalle draghe degli ulteriori passaggi pulitura (*sweep pass*), in modo da tentare di rimuovere solo uno strato sottile di materiale superficiale contenente residui ed uno spessore minimo di materiale pulito. Questa procedura può risultare però inefficace e costosa;
- **copertura dei residui** - Con questa soluzione viene disposto sopra ai residui un sottile strato di materiale pulito (di solito un paio di centimetri) in modo da realizzare un isolamento nel breve termine e una riduzione della contaminazione nel lungo periodo. Il materiale pulito utilizzato per ricoprire i residui non deve essere necessariamente sabbia: argilla e altri materiali organici, sono da preferire in quanto capaci di ridurre la biodisponibilità⁷ dei contaminanti. La copertura è indicata per livelli di residui sufficientemente sottili e per contaminanti in concentrazioni sufficientemente basse tale che l'eventuale miscelazione dei materiali di copertura con i residui sottostanti garantirebbe comunque un'adeguata protezione;
- **strato di isolamento** - Uno strato di isolamento può essere necessario nel caso in cui ci siano consistenti strati di residui che non possono essere rimossi in modo efficace.

5.9 Discarica in mare - Open water disposal

Questo tipo di smaltimento può avvenire in mare aperto, negli estuari, fiumi o laghi; le opzioni da B ad F, nella figura 5.23 includono misure di controllo per ridurre la diffusione del materiale e/o per formare un isolamento dall'ambiente circostante.

Questo tipo di strutture possono essere distinte in due categorie: dispersive e (relativamente) non dispersive, a seconda che i sedimenti vengano trasportati al di fuori o rimangano nella zona confinata. Sulla base della definizione data dal PIANC, (M. W. G. 10 1986), si identificano quattro posizioni possibili:

- mare aperto: zone oltre la piattaforma continentale o dove la profondità dell'acqua è maggiore di 200 metri. In questo caso il materiale dragato rimane qui;
- zone tra la piattaforma continentale fino ad una profondità di 40 metri, caratterizzate da energia relativamente alta, correnti di marea e onde;
- zone vicino alla costa, comprese tra profondità di 40 metri e linea dei frangenti; il potenziale per il trasporto dei sedimenti qui è considerevole;

⁷Una molecola (spesso un inquinante organico persistente) è detta essere biodisponibile quando è disponibile ad attraversare la membrana cellulare di un organismo dall'ambiente, se l'organismo ha accesso alla sostanza chimica

- zone adiacenti agli estuari, fiumi o insenature; le correnti di marea possono essere notevoli.

Generalmente il materiale idoneo a questo tipo di smaltimento è quello pulito o leggermente contaminato anche se, con apposite misure di controllo, è possibile smaltire anche quello contaminato. Vengono utilizzate chiatte, draghe aspiranti rifluenti e condotte per lo scarico, considerando che, in aree vicine alla zona di dragaggio, si può utilizzare anche la modalità meccanica.

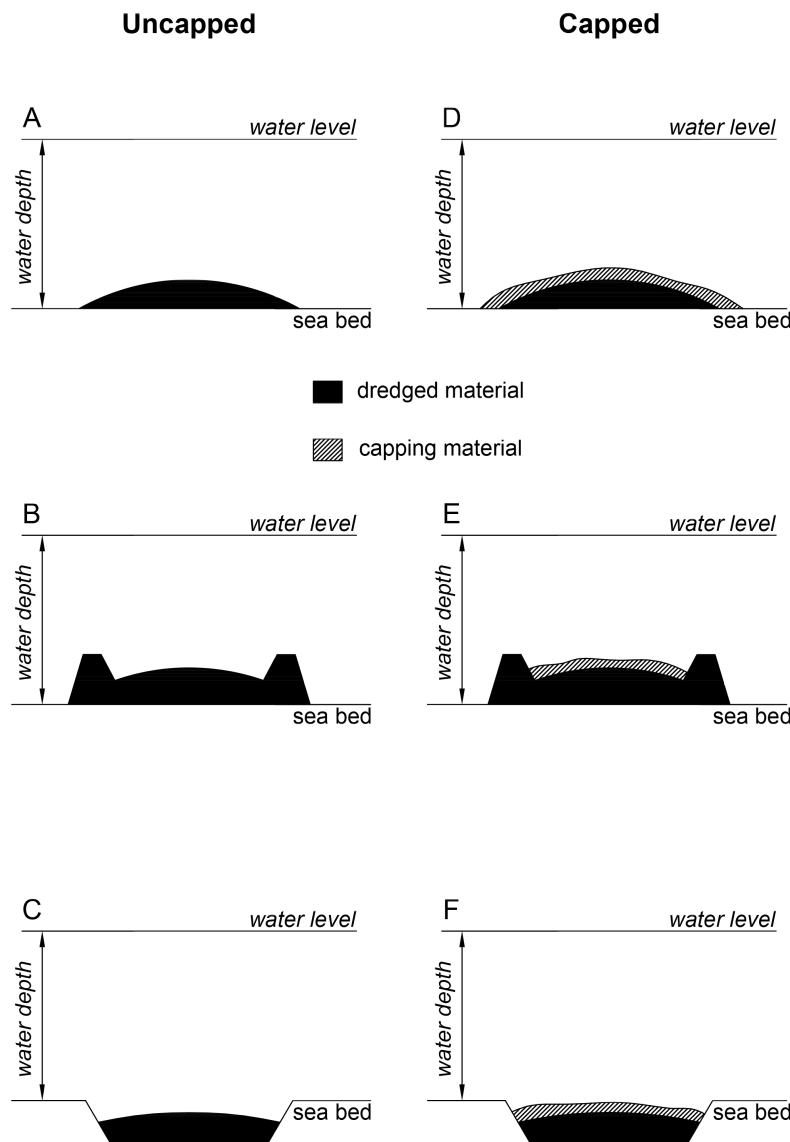


Figura 5.23: Opzioni per il deposito in mare: A: libero; B-C: con contenimento laterale; D: copertura sul fondo; E-F: deposito acquatico contenuto

5.9.1 Comportamento del materiale durante e dopo lo scarico

Il comportamento fisico del materiale può essere analizzato nel breve e nel lungo periodo.

Nel primo, che riguarda le fasi dello scarico e quelle immediatamente successive, il materiale scende per gravità sottoforma di nuvola concentrata o getto e, toccando il fondo, collassa con la formazione di un'onda orizzontale. La maggior parte del

materiale (80 ÷ 95 %) raggiunge il fondo formando un ammasso che va da una decina fino a un centinaio di metri; se i sedimenti contengono gas o aria, c'è la possibilità di avere forte turbolenza durante la discesa convettiva, che di conseguenza genera più torbidità del normale. Il materiale scaricato tramite condotta è un fluido che può contenere blocchi di argilla, ghiaia o sabbia grossolana; il materiale più grossolano si assesta velocemente sul fondo, mentre la miscela di acqua e materiale più fine scende lentamente per formare un ammasso fangoso. Le particelle più fini possono rimanere in sospensione. Lo scarico tramite draga aspirante rifluente convoglia una miscela di acqua e materiale solido: nel sito prescelto, il fondo della draga viene aperto e l'intero contenuto viene riversato in pochi minuti in mare. Sottoforma di getto o di fluido ad alta densità, il materiale raggiunge il fondo, anche se una piccola parte di esso può espandersi radialmente dopo l'impatto. Il materiale scaricato dalle chiatte è caratterizzato da una densità pari a quella che ha in situ; esso scende rapidamente verso il fondale formando un ammasso più stretto rispetto ai due casi precedenti (figura 5.24). I sedimenti più fini, in tutti e tre i casi, rimangono in sospensione per ore in quanto sono dotati di una bassa velocità di sedimentazione e possono quindi essere trasportati oltre i confini della zona di scarico.

Il comportamento a lungo termine, della durata di mesi o anni, prende in considerazione invece i processi che coinvolgono la stabilità dell'ammasso formato durante la discarica ed il trasporto e ri-deposito del materiale eroso dall'ammasso stesso. I fattori che influiscono maggiormente sulla stabilità sono la consolidazione e l'erosione. La prima è causata dall'espulsione dell'acqua contenuta nei pori del materiale, producendo una diminuzione del volume dell'ammasso (50 %). La seconda deriva invece da correnti, gradienti di densità, onde e vento: l'eccesso di pressione neutrale indotta dalle onde può comportare l'instabilità dell'ammasso, con relativa proiezione del materiale per più di un chilometro. Di particolare effetto è anche l'erosione prodotta dagli organismi acquatici che colonizzando l'ammasso, essi possono infatti comprometterne la stabilità.

La destinazione dei sedimenti erosi è dettata dall'idrodinamica locale: il materiale può depositarsi in un ambiente a bassa energia o integrarsi nel naturale processo di trasporto della zona.

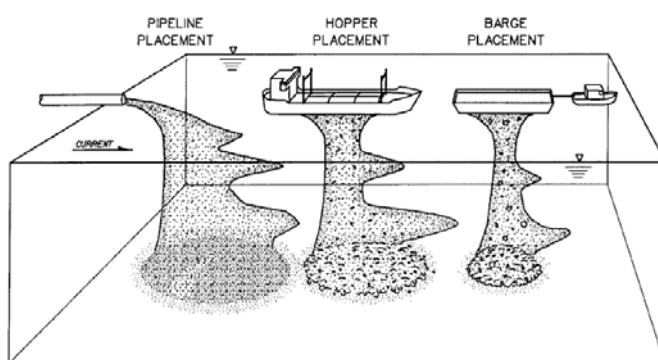


Figura 5.24: Comportamento del materiale come funzione del metodo di scarico

5.9.2 Valutazione dell'impatto fisico e dei contaminanti

A seguito della copertura del fondale nel sito di deposito, possono presentarsi problemi di impatto ambientale in quanto vengono intrappolate le colonie di organismi bentonici che non riescono a migrare altrove: tutto questo causa modifiche

nella composizione della flora e fauna, dovute alle proprietà chimiche e fisiche del materiale versato. Aree di riproduzione, coltivazioni di molluschi, letti di corallo ed alghe marine possono facilmente danneggiarsi a causa della sospensione dei sedimenti.

Durante e subito dopo l'operazione di scarico, il temporaneo aumento della concentrazione di solidi sospesi nella colonna d'acqua non causa effetti più negativi di quelli dovuti a mareggiate, forti correnti o attività come la pesca. Ci sono casi però in cui un'alta concentrazione di solidi sospesi, anche se temporanea, riduce la fotosintesi, impedisce la mobilità ed interferisce con la respirazione e la nutrizione. Lo scarico può indurre cambiamenti anche al movimento dell'acqua e dei sedimenti a seguito della modifica della morfologia del fondale o dell'aumento dell'erosione costiera, nel caso di deposito vicino la costa.

Per determinare la fattibilità ambientale di un'operazione di discarica di questo tipo, e per identificare le necessarie misure di controllo, devono essere valutati i seguenti parametri:

- **geometria dell'ammasso** - La conoscenza di questo parametro è fondamentale per assicurare che l'impronta dello scarico non si estenda oltre i confini del sito e che la sua altezza non ecceda i limiti per la navigazione e/o per l'erosione; è importante anche per valutare la capacità di ritenzione e, se l'ammasso deve essere ricoperto, per calcolare il volume di copertura necessario. La geometria dell'ammasso dipende dalle caratteristiche fisiche del materiale (granulometria e coesione) e dai metodi di discarica. Ad oggi, la maggior parte di queste strutture, realizzate soprattutto negli Stati Uniti, presenta forma circolare o ellittica con cresta piuttosto piatta, pendenza maggiore sul lato interno e minore su quello esterno, grembiule sottile ($1 \div 15$ cm) esterno di materiale fine che si estende oltre i fianchi anche per centinaia di metri;
- **dispersione** - È un fattore critico per decidere se lo scarico sia accettabile o meno in termini di impatto nel corpo idrico: in questo caso la dispersione può essere ridotta con l'ausilio di silt curtains o tramite scarico sommerso e, in ogni caso, i modelli numerici disponibili permettono di predire lo sviluppo della concentrazione dei solidi sospesi nel tempo e nello spazio subito dopo lo scarico del materiale;
- **consolidazione** - Quando si intende usare delle aree per stoccare grandi quantità di materiale, proveniente da diversi progetti di dragaggio realizzati in anni successivi, lo studio della consolidazione permette di valutare il movimento dell'acqua interstiziale ed il flusso dei contaminanti dai sedimenti verso la colonna d'acqua o lo strato di copertura. Inoltre, è utile per valutare, per ammassi ricoperti, se sia necessaria una rifioritura di materiale per garantire la tenuta prevista;
- **risospensione ed erosione** - Il materiale depositato può rimanere all'interno dei confini designati in fase di progettazione o muoversi sotto l'effetto di onde e correnti; risospensione ed erosione sono funzioni della velocità al fondo, della granulometria e coesione. I modelli di trasporto usuali danno questo tipo di informazioni, per stabilire se sia necessario coprire l'ammasso con del materiale meno soggetto ad erosione;
- **trasporto e deposito** - Qualora sia confermata l'erosione dell'ammasso tramite modelli matematici, occorre determinare la destinazione e lo spessore

dei sedimenti che andranno a ridepositarsi, in relazione alle caratteristiche idrodinamiche della zona.

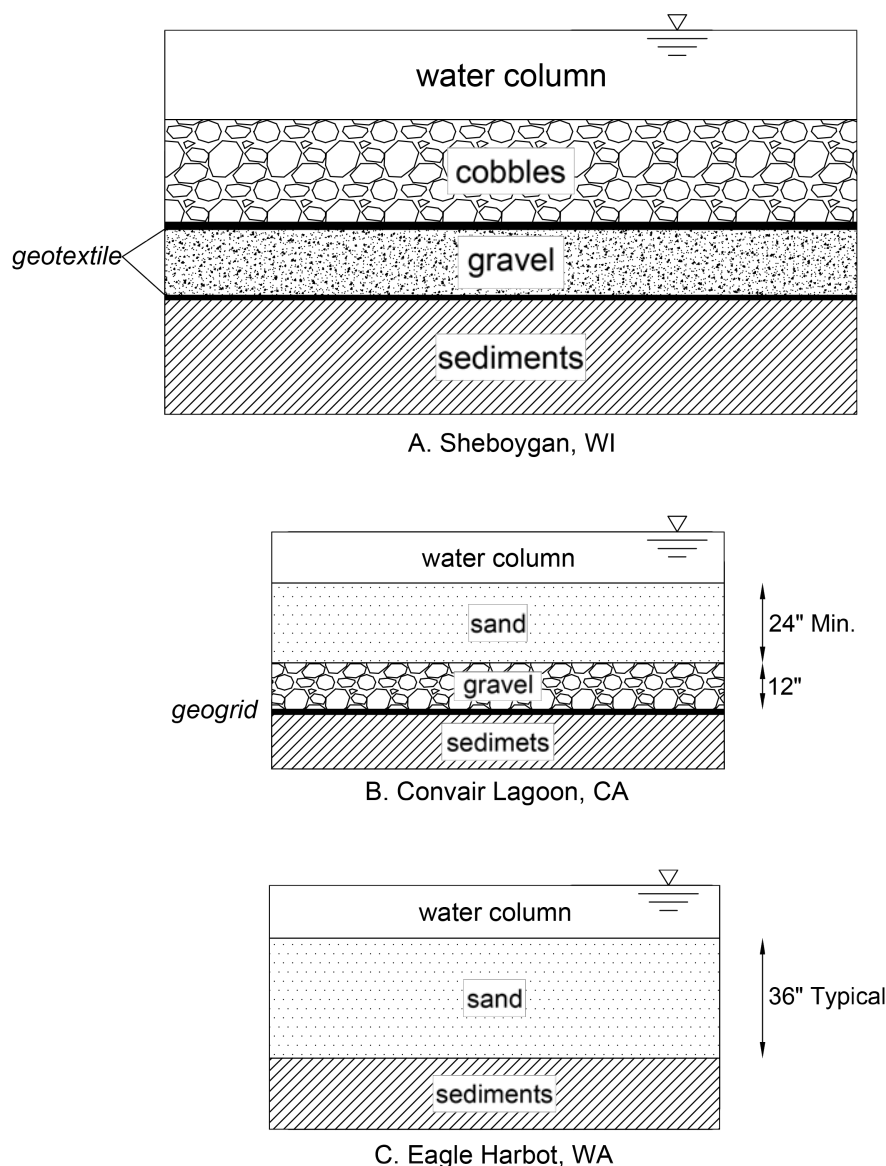


Figura 5.25: Diverse realizzazioni di capping negli USA

5.9.3 Misure di controllo

Nel materiale dragato sono presenti composti pericolosi che possono essere assorbiti dagli organismi acquatici, con effetti cancerogeni e mutageni. L'esposizione della flora e fauna marina a queste sostanze è dovuta alla dispersione e sospensione dei sedimenti durante e subito dopo lo scarico: qualora l'impatto sull'ambiente non sia accettabile, devono essere considerate opportune misure di controllo. Queste, come già analizzato in precedenza, consistono nell'utilizzo di silt curtains, nella modifica delle operazioni di scarico (come, ad esempio, diminuire la velocità della draga), nell'utilizzo di metodi di discarica sommersi (validi soprattutto se il materiale contiene gas o aria).

Oltre alle misure di controllo citate, il *capping* o isolamento, consiste nell'accurato e controllato posizionamento del materiale contaminato, seguito dalla

posa di uno strato isolante di materiale pulito. Si possono distinguere due tipi di isolamento: il primo, LBC (Level bottom capping), consiste nel posizionamento del materiale contaminato in una zona a debole pendenza, con la successiva copertura di materiale pulito; il secondo, CAD (contained aquatic disposal), è rafforzato da contenimento laterale. In entrambi i casi i sedimenti contaminati sono isolati dal resto dell'ambiente in modo tale che non vengano risospesi e quindi trasportati altrove. E' importante infatti che si abbia un basso potenziale di erosione e che il

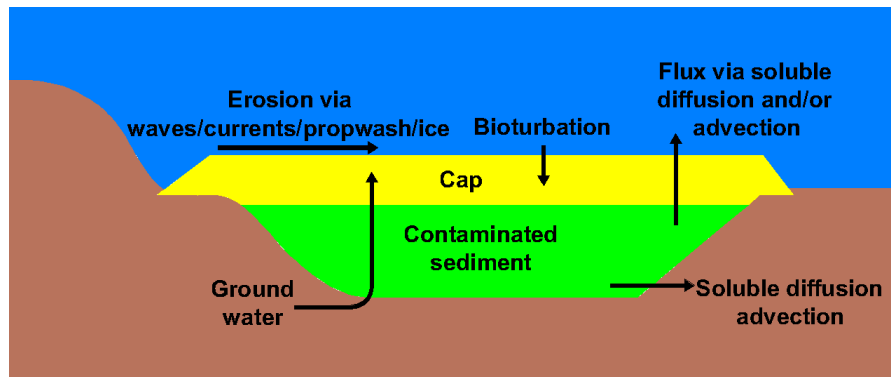


Figura 5.26: Schema capping

materiale isolante non venga disperso, né mischiato con i sedimenti contaminati; è quindi essenziale un'efficace sistema di monitoraggio per determinare l'effettivo isolamento dei sedimenti e per valutare la necessità di rinforzare il sistema di confinamento. Il *capping* è realizzato con materiale granulare non contaminato, come sabbia, sedimenti, terreno; a volte, per esigenze particolari, si realizzano capping più complessi con più strati di materiali diversi e con la presenza di geotessili che hanno lo scopo di impedire il mescolamento dei sedimenti contaminati con il materiale isolante. Di solito si preferisce l'impiego di sabbie naturali dal momento che queste presentano un'associazione di materiale fine e contenuto di carbonio organico che risulta molto efficace nell'isolamento chimico dei sedimenti contaminati. Per fornire una protezione a lungo termine, il *capping* deve essere sufficientemente spesso da separare efficacemente i sedimenti contaminati dagli organismi acquatici che vivono e si nutrono nell'area d'interesse; ciò si realizza prevedendo anche l'impiego di misure che impediscano la colonizzazione ed il disturbo del sito da parte di questi organismi. I maggiori problemi per questo tipo di strutture derivano dal consolidamento, in seguito al quale le particelle di terreno vengono riorganizzate in uno stato più denso accompagnato dall'espulsione di acqua interstiziale, o da variazioni di sforzo tagliante all'interno del materiale, (Rollings 2000). Il primo è un fenomeno a lungo termine che colpisce la capacità del sito, mentre il secondo, derivante dal collasso della struttura o dal fallimento della capacità portante della stessa, causa modifiche di quota dell'ammasso. Sul seguito vengono analizzati i metodi di verifica per entrambi i problemi di capacità portante e stabilità, utili a definire dei fattori di sicurezza da adottare già in fase progettuale.

Calcolo capacità portante

La capacità dell'ammasso di materiale dragato scaricato sul fondo può essere valutata con la relazione proposta da Tang nel 1962:

$$q_{ult} = \frac{Q}{A} = cN_c + \gamma DN_q + 0.5\gamma BN_\gamma \quad (5.15)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{ult} = \text{capacità portante ultima (lb/ft}^2\text{)} \\ Q = \text{capacità portante ultima (lb)} \\ A = \text{area di base} \\ c = \text{coesione (lb/ft}^2\text{)} \\ N_c, N_q, N_\gamma = \text{fattori di capacità portante di Terzaghi} \\ \gamma = \text{unità di peso del terreno (lb/ft}^3\text{)} \\ D = \text{profondità di fondazione (ft)} \\ B = \text{larghezza (ft)} \end{array} \right.$$

In condizioni non drenate $N_\gamma = 0$ e, per carico superficiale $D = 0$, quindi l'equazione 5.15 si riduce, con $N_c = 5.14$, a:

$$q_{ult} = 5.14c \quad (5.16)$$

Utilizzando la densità del materiale isolante, il fattore di sicurezza (FOS) per mancanza di capacità portante dello strato di copertura, può essere calcolato come:

$$FOS = \frac{\text{Capacità portante ultima}}{\text{Carico applicato dalla sabbia}} = \frac{q_{ult}}{h\gamma_s} \quad (5.17)$$

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} h = \text{spessore strato isolante (ft)} \\ \gamma_s = \text{unità di peso della sabbia (lb/ft}^3\text{)} \end{array} \right.$$

Se non sono disponibili dati sulla densità per il tappo di sabbia, un valore pari a 1650 kg/m^3 (103 lb/ft^3) può essere assunto per i calcoli preliminari. La figura 5.27 mostra il fattore di sicurezza calcolato contro la resistenza del terreno per uno spessore iniziale dello strato isolante di 0.3 m (1 ft), uno spessore intermedio di 0.6 m (2 ft), e di 1 m (3.3 ft). Tabella 5.1 mostra la resistenza necessaria con fattori di sicurezza pari ad 1 e 3.

Spessore strato	Resistenza terreno, Pa	
	FOS=1	FOS=3
0.3 m (1 ft)	383 (8)	1 149 (24)
0.6 m (2 ft)	766 (16)	2 298 (48)
1 m (3.3 ft)	1 245 (26)	3 687 (77)

Tabella 5.1: Resistenza del terreno necessaria a seconda del fattore di capacità portante

I calcoli di capacità portante precedenti rivelano che il rapido posizionamento di un rivestimento isolante potrebbe comportare un fallimento della capacità portante, con conseguente spostamento verso l'alto del materiale contaminato sottostante, riduzioni di spessore dello strato di rivestimento ed esposizione del materiale inquinato.

Analisi di stabilità con superfici di rottura piane

Per lunghi pendii dove gli effetti finali sul materiale che scorre sono trascurabili, un'analisi di stabilità con superfici di rottura piane può essere espressa come:

$$FOS = \frac{c_u}{\gamma_z \left(\frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)} \quad (5.18)$$

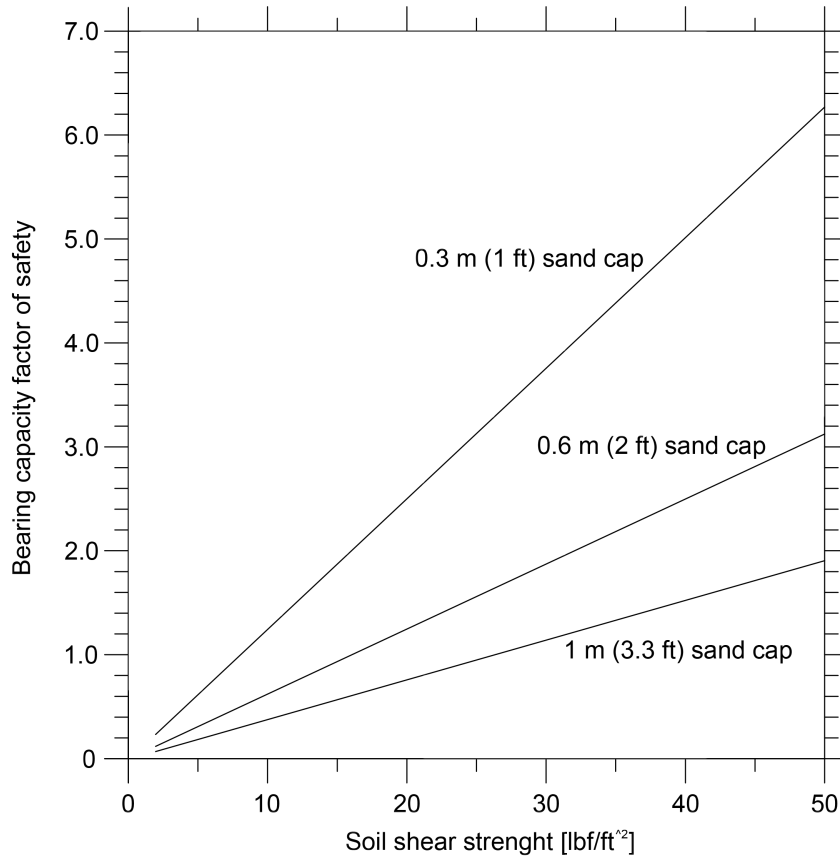


Figura 5.27: Fattore di capacità portante per diversi spessori di sabbia in funzione della resistenza a taglio del terreno in condizioni non drenate

dove:

$$\left\{ \begin{array}{l} FOS = \text{fattore di sicurezza per lo scorrimento} \\ c_u = \text{resistenza a taglio non drenata (lb/ft}^2\text{)} \\ \gamma = \text{unità di peso della sabbia (lb/ft}^3\text{)} \\ z = \text{profondità dove si ha scorrimento (ft)} \\ \alpha = \text{pendenza} \end{array} \right.$$

Questo tipo di analisi è appropriata per lunghi ammassi continui come quelli formati in seguito al deposito di materiale dragato: lo spessore del materiale instabile è piccolo rispetto all'altezza del pendio, e su ciascun blocco verticale del terreno sopra il piano di scorrimento previsto, agiscono le stesse forze. L'analisi indicherà anche le varie combinazioni di inclinazione e la massima altezza del deposito in condizioni di stabilità.

5.10 Vasche di colmata - CDF (*Confined disposal facilities*)

Questo tipo di struttura comprende sia impianti di smaltimento confinati realizzati in acqua che impianti a terra: il principale obiettivo è quello di contenere il materiale solido dragato permettendo però lo scarico dell'acqua. Qualora il materiale da stoccare sia contaminato, occorre che il sito di deposito assicuri un isolamento efficiente dall'ambiente circostante.

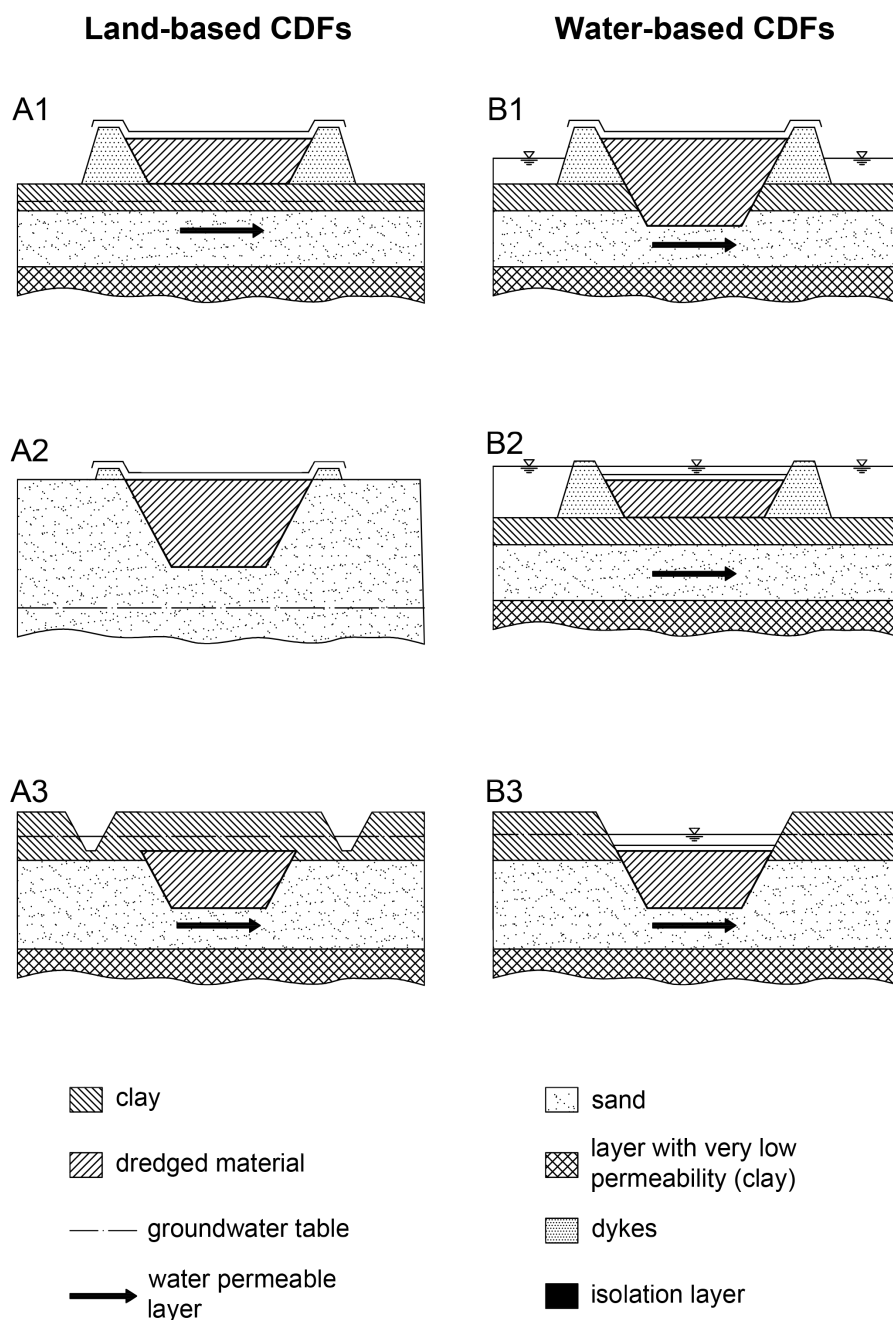


Figura 5.28: Opzioni per vasche di colmata

Le vasche di colmata possono essere totalmente o parzialmente sotto al pelo libero dell'acqua: alcune possibili soluzioni sono riportate in 5.28. Il progetto di un CDF è specifico per ogni sito: le dighe in acqua vengono solitamente costruite in strati di ghiaia protettiva pesante all'esterno e progressivamente più piccola verso l'interno (5.29); in figura 5.30 invece viene rappresentato un particolare costruttivo per le sezioni laterali e di fondo della vasca. Il materiale dragato viene normalmente conferito nella vasca per via idraulica, tramite condotta o pompaggio dalla draga.

Il problema maggiore che si riscontra attualmente è quello di individuare zone adatte alla realizzazione dei CDF, specialmente nelle fasce costiere, dove il bisogno è maggiore: esse sono visibili da riva e, nella valutazione dei diversi tipi

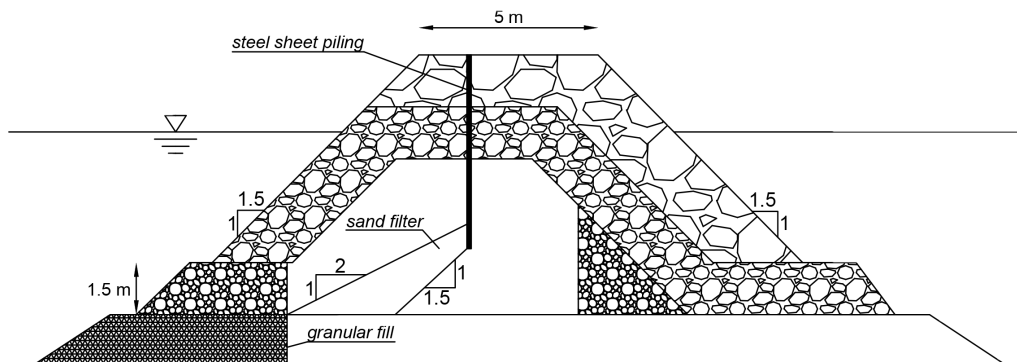


Figura 5.29: Sezione tipo di diga per CDF con strato filtrante

di utilizzo della zona costiera stessa, entrano in competizione con altri usi come quello turistico, naturalistico, etc. Per facilitarne l'accettazione da parte della gente, l'elemento che diventa indispensabile è il *beneficial use*: sviluppo di habitat e di nuovi territori. Le vasche di colmata vengono utilizzate in modo periodico ed il loro riempimento può durare anni; lo scarico continuo infatti potrebbe dare problemi a quelle zone vicine alla costa utilizzate con scopo di conservazione.

In origine non era preso in considerazione l'utilizzo dei CDF come trattamento dei materiali inquinati ma le ricerche odierne si stanno orientando verso il naturale processo di riduzione dei contaminanti, estendendo così le funzioni delle vasche.

5.10.1 Comportamento del materiale dragato

Per quanto riguarda il comportamento fisico di una vasca di colmata attiva, come illustrato in figura 5.31, quando il materiale dragato viene depositato in forma liquida, la frazione più grossolana scende rapidamente vicino la zona di scarico formando un ammasso, mentre quella più fine continua a circolare nella zona di contenimento per depositarsi più lentamente. L'acqua pulita esce tramite un'opera di sbocco. Il tasso di corrente uscente, per operazioni di scarico continue, è circa pari a quello entrante: una volta che il materiale consolida, l'acqua dei pori (probabilmente contaminata), viene espulsa. La consolidazione dura per un periodo abbastanza lungo dopo la fase di scarico, riducendo così il volume occupato. A meno che non venga impedito, la superficie inizia ad asciugarsi e, in relazione al livello dell'acqua adiacente, il materiale depositato può essiccarsi attraverso l'intero profilo verticale: la superficie può incrinarsi e vegetare.

Il comportamento fisico-chimico e bio-chimico della vasca prevede che non appena il materiale dragato inizia ad asciugare e risulta quindi esposto all'atmosfera, comincia l'ossidazione: l'acqua inizialmente scura diviene via via più chiara così come il materiale. L'ossidazione e la riduzione del pH, specialmente nei sedimenti marini, e le conseguenti trasformazioni chimiche, possono avere un impatto significativo sulla mobilità dei contaminanti. Se il sedimento è ricco in zolfo, materia organica, e povero in carbonati, l'ossidazione può causare la formazione di condizioni fortemente acide: queste aumentano il rilascio di particolato di metalli nell'acqua interstiziale e nella corrente. Le condizioni non sature del materiale dragato attraverso l'intero profilo verticale della vasca avvengono solo quando le vasche di colmata sono costruite a terra sopra il livello di falda, mentre in ambiente acquatico, la maggior parte dei contaminanti rimane chimicamente immobile.

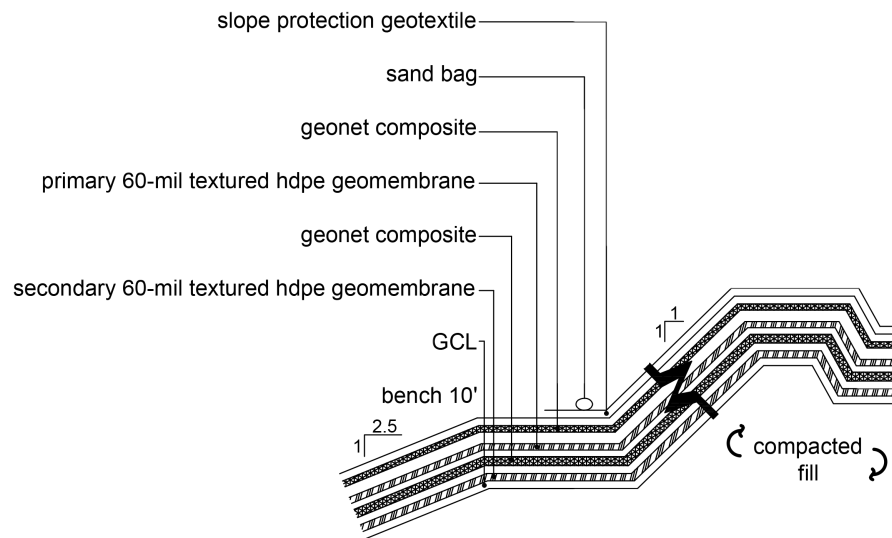
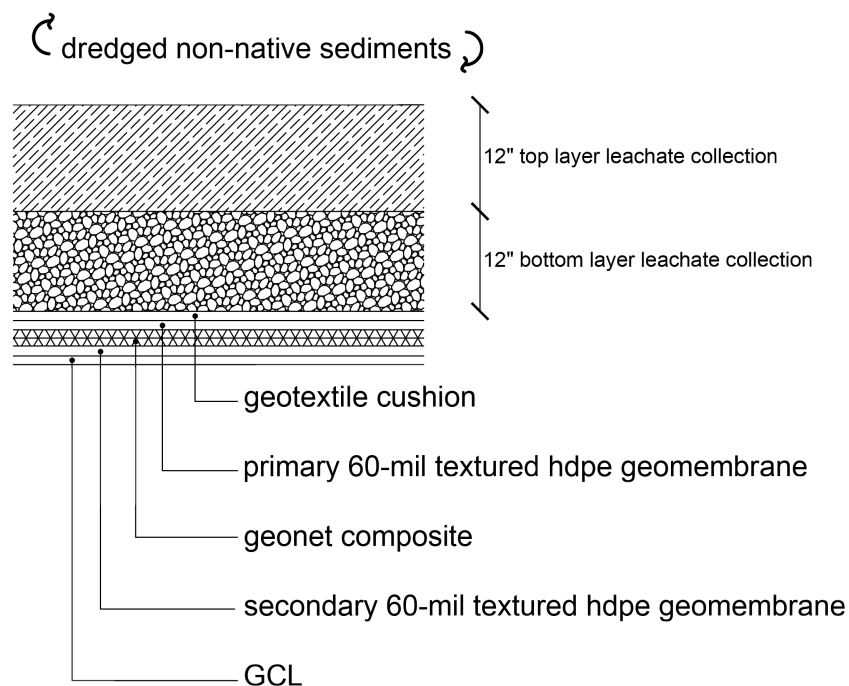
(a) *Sezione laterale*(b) *Sezione al fondo*

Figura 5.30: Esempi di sezioni correttive per CDF

In aggiunta al proprio effetto sulla mobilità dei contaminanti, la biodegradazione delle componenti organiche, sia quelle presenti naturalmente che quelle derivanti dagli inquinanti, ha un altro significativo effetto con conseguenze sull'ambiente: la produzione di gas come metano e anidride carbonica.

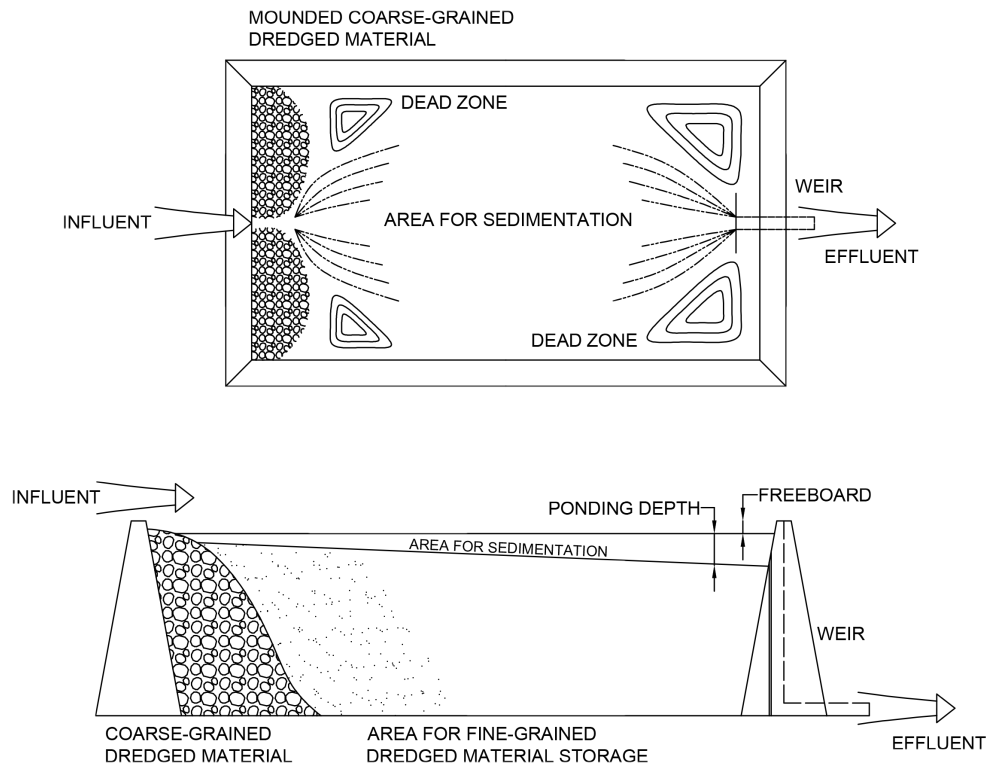


Figura 5.31: Diagramma schematico di un CDF attivo

5.10.2 Caratteristiche del sito

Le caratteristiche di un particolare sito possono evitare o ridurre gli eventuali impatti sull'ambiente limitando così le misure di controllo e quindi i costi: l'impatto su una falda si può evitare scegliendo un sito caratterizzato da strati di argilla. Alcuni parametri da prendere in considerazione sono:

- considerazioni sulla proprietà del luogo, sulle restrizioni della zona (vicinanza ad un'opera di presa), configurazione del sito ed accesso;
- caratteristiche fisiche: terreno di fondazione e stratigrafia, topografia, idrologia sotterranea, tipo di clima;
- caratteristiche chimiche: geochimica, contaminazione del terreno di fondazione;
- caratteristiche biologiche: tipo di habitat, possibilità di assorbimento e di movimento dei contaminanti nella catena alimentare;
- altri parametri ambientali: vicinanza ad aree sensibili al rumore, alle polveri, agli odori, e a zone di interesse culturale e naturalistico;
- caratteristiche operative: capacità del sito, facilità di accesso e di monitoraggio.

Per ridurre l'impatto fisico sull'ambiente occorre intervenire diminuendo il volume del materiale prima o dopo lo scarico. Questo può essere ottenuto modificando le operazioni di dragaggio e di scarico: riducendo la profondità di scavo, aumentando la concentrazione nelle condotte o utilizzando tecniche meccaniche anziché idrauliche. In aggiunta si può ottimizzare il dewatering del sito di deposito

con uno scavo di superficie, con la suddivisione in celle e con sistemi di drenaggio verticale o orizzontale.

5.10.3 Altri usi dei CDF durante e dopo l'utilizzo

Nelle aree dove vengono realizzati i CDF vi è, in generale, un crescente interesse per gli utilizzi successivi di questi siti e delle zone adiacenti a causa dell'urbanizzazione in continuo sviluppo. Prevedere degli usi multipli può abbassare i costi stessi di utilizzazione e creare un valore aggiunto all'area riducendo l'impatto visivo e migliorando la percezione della gente verso il ruolo di queste strutture.

Le vasche di colmata dovrebbero essere unicamente impiegate per il contenimento del materiale dragato contaminato, per il quale il trattamento per altre destinazioni d'uso non è fattibile. Il periodo di utilizzazione di un CDF è di circa alcune decine di anni; questo implica che tecniche non ancora disponibili in fase di progetto o troppo costose, possono diventare fattibili dopo un pò di tempo. Nella fase di progetto di una vasca di colmata, dovrebbero essere prese in considerazione quelle strutture per il trattamento del materiale dragato inquinato ed il successivo stoccaggio dei prodotti trattati. Anticipando la produzione di materiale da costruzione da un CDF, alcune parti della struttura possono essere realizzate in una fase successiva. Per il progetto e l'ubicazione di un nuovo CDF dovrebbero essere presi in considerazione possibili altri utilizzi, specialmente in vista di un suo impiego a lungo termine. Il progetto dovrebbe essere flessibile in modo tale che, qualora ci fosse bisogno in futuro di ulteriore capacità di confinamento, le modifiche tecniche per ottimizzare la capacità stessa o il processo di trattamento, possano essere eseguite facilmente.

Alcune opzioni per un uso multiplo dei CDF possono essere realizzate già durante il periodo di utilizzazione (trattamento dell'acqua, produzione di energia, etc.), mentre altre devono essere eseguite dopo (utilizzo industriale, commerciale e turistico). Di seguito sono presentati alcuni possibili utilizzi di un CDF.

- **trattamento acque** - la maggior parte dei CDF è dotata di strutture per il trattamento dei propri scarichi o dell'acqua piovana in eccesso; esse consistono prevalentemente in bacini di sedimentazione. Tali bacini richiedono molto spazio e possono facilmente essere trasformati in un habitat adatto per varie specie di uccelli, dopo aver piantato canneti o piante alofite al loro interno. Un'altra possibilità è la creazione di aree umide, che favoriscono la purificazione dell'acqua.
- **produzione di energia** - i CDF sono spesso ubicati vicino alla costa e sufficientemente lontani dalle attività urbane, in posti quindi caratterizzati da favorevoli condizioni del vento: ci sono in questi casi i presupposti per l'installazione di strutture per la produzione di energia eolica e solare (Sfuffer CDF, Paesi Bassi).
- **forestazione** - i siti delle vasche di colmata possono dare spazio a molti tipi di impiego in agricoltura (beni di consumo non alimentari) dopo il periodo di utilizzo (ad esempio la produzione di cotone), o a scopo di forestazione, per produrre carta o legno. La scelta del tipo di pianta da installare si basa sulle caratteristiche del sedimento contaminato presente all'interno del CDF e dello strato superiore usato: alcuni alberi come il salice, hanno la capacità di estrarre i contaminanti dai sedimenti, come accade per le piante alofite presenti nelle zone umide. Questo tipo di utilizzo riduce l'emissione di polvere e risulta ancora una zona ideale per specie animali.

- **uso industriale e commerciale** - il materiale dragato contaminato può essere stoccato in una vasca di colmata in modo tale che il sito possa essere adibito ad area industriale o commerciale. In questo caso va posta particolare attenzione al drenaggio del sito, al processo di maturazione del sedimento, alle sue caratteristiche chimiche e meccaniche e alla percezione della gente.
- **valorizzazione dell'habitat** - molti siti di discarica abbandonati hanno un alto potenziale ecologico: nella fase finale di utilizzo di un CDF si può considerare quale habitat sia più favorevole a seconda della ragione. La natura dello strato superiore del sito determina il tipo di habitat che si svilupperà.
- **uso turistico** - le possibilità in questo campo sono notevoli dopo il periodo di utilizzazione del CDF: campi da golf, attività acquatiche, pesca, etc. (IJsseloo, Paesi Bassi)
- **pianificazione territoriale** - un CDF è una struttura piuttosto ampia che ha delle conseguenze per la pianificazione territoriale nella zona dove è realizzata, ossia soprattutto vicino ai porti e alle zone industriali. In queste zone c'è spesso un conflitto tra l'uso industriale del territorio e le funzioni urbane. Un CDF può fungere da tampone tra area industriale ed area urbana nella fase di utilizzo, e successivamente da area turistico-ricreativa come accennato prima. Esso può inoltre servire come struttura di protezione per la costa dall'azione delle onde.

5.11 Trattamento

Non esiste un'unica tecnologia di trattamento in quanto ogni sedimento richiede specifiche analisi, valutazioni e prescrizioni; questo significa che per affrontare più contaminanti in diverse proporzioni, come i metalli pesanti, gli olii e i loro derivati, i composti organici del cloro, i PAHs⁸ e i PCBs⁹ può essere necessario più di un singolo processo di trattamento.

I processi di trattamento possono essere classificati come segue:

- di pre-trattamento;
- fisico-chimici;
- biologici;
- termici;
- elettrocinetici;
- di immobilizzazione.

È importante sottolineare che tutti i processi di trattamento hanno un proprio impatto sull'ambiente, che va dalle acque reflue all'emissione di gas. Alcune tecniche producono residui concentrati altamente dannosi che devono essere trattati o stoccati con estrema cura. Altri processi richiedono elevate quantità di energia, altri ancora notevoli porzioni di territorio.

⁸idrocarburi policiclici aromatici, idrocarburi costituiti da due o più anelli aromatici quali quello del benzene fusi fra loro in un'unica struttura

⁹policlorobifenili, classe di composti organici la cui struttura è assimilabile a quella del bifenile i cui atomi di idrogeno sono sostituiti da uno fino a dieci atomi di cloro; sono considerati inquinanti persistenti dalla tossicità in alcuni casi simile a quella della diossina

5.11.1 Pre-trattamento

Lo scopo è quello di ridurre il volume del materiale dragato contaminato che richiede ulteriori trattamenti o uno smaltimento speciale. Sono tecniche basate sulla capacità di adesione dei contaminanti alla frazione più fine e coesiva dei sedimenti: in questo modo se la parte fine può essere separata, la rimanente parte più grossolana può essere utilizzata in modo vantaggioso o smaltita in sicurezza. La separazione avviene in modo meccanico con tecnologie ormai consolidate ma il pre-trattamento non è conveniente se la frazione grossolana è piuttosto scarsa. Esistono varie tecniche:

- **bacini di separazione** - il materiale grossolano viene separato da quello fine tramite lavaggio con getti d'acqua;
- **idrocycloni**¹⁰ - hanno un largo utilizzo per sabbia, ghiaia e nelle industrie di lavorazione dei minerali per separare materiali con differente densità o peso tramite una malta fluida. Il funzionamento è basato sulla forza centrifuga e, non avendo gli idrocycloni, parti in movimento, richiedono una bassa quantità di energia per il funzionamento. La malta fluida entra nella camera di alimentazione sotto pressione, l'ingresso in direzione tangente obbliga la malta a ruotare ad elevata velocità angolare, forzando le particelle più grosse o più pesanti a posizionarsi sulle pareti e a scendere successivamente verso il fondo della sezione conica, per uscire più densa. La corrente a spirale forma un vortice centrale a bassa pressione, il quale fa sì che il materiale più fine e l'acqua vengano trasportati verso l'alto ed escano dalla condotta superiore;

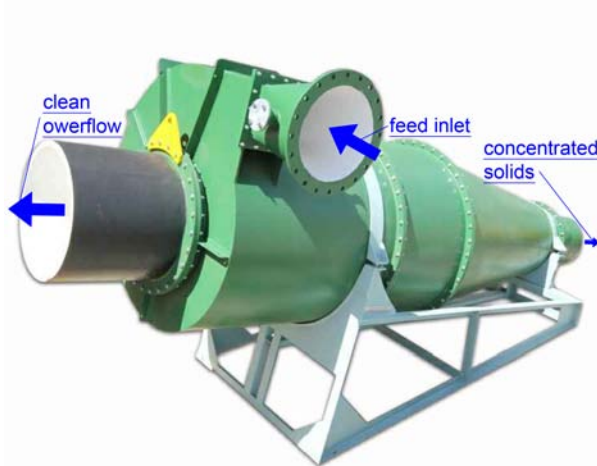


Figura 5.32: Diagramma schematico di un idrociclone

- **galleggiamento** - le particelle vengono separate dalla massa liquida utilizzando la differenza di densità. Il metodo è stato usato per la separazione di petrolio e zolfo di metallo;
- **disidratazione** - è una fase del post-trattamento impiegata per migliorare la consistenza del materiale e renderlo più facile da manovrare, in modo tale da ridurre i costi. Questo può essere un rischio per i sedimenti a grana più fine come il limo e l'argilla, che richiedono l'ausilio di filtri ed addensanti. È una tecnica abbastanza economica, anche se è probabile che l'acqua stessa sia contaminata e necessiti quindi di un trattamento speciale;

¹⁰separatori centrifughi

- **separazione magnetica** - per rimuovere il materiale magnetico nelle operazioni di bonifica di terreni contaminati vengono impiegati grandi magneti.

5.11.2 Trattamenti fisico-chimici

Questo tipo di trattamenti comprende l'uso di processi chimici per rimuovere, cambiare o stabilizzare i contaminanti.

- **tecniche di estrazione** - richiedono l'uso di solventi; non distruggono i contaminanti ma li concentrano in un volume ridotto e li trasferiscono in una fase acquosa. Esistono quattro tipi di tecniche di estrazione:
 - *estrazione acida*: è applicabile specialmente ai metalli pesanti tranne che al cadmio. È possibile che vengano a formarsi composti indesiderati se è presente della materia organica;
 - *estrazione per complessazione*: comporta l'uso di prodotti chimici organici che formano complessi¹¹ con i metalli, estraendoli in tal modo dalla matrice dei sedimenti e mettendoli in soluzione. Questa tecnica mostra i suoi vantaggi a scala di laboratorio;
 - *estrazione con solvente*: utilizzata negli USA e conosciuta come BEST (Basic extractive sludge treatment) riguarda la rimozione di contaminanti organici per formare una matrice solida o liquida, a mezzo di solventi specifici;
 - *estrazione con fluidi supercritici*: non è stata ancora dimostrata su larga scala per il materiale dragato ma rimane comunque una tecnologia comprovata per alcuni processi industriali.
- **tecniche di immobilizzazione** - il materiale è trattato in modo tale che i contaminanti si fissano alla materia solida e diventano immobili; il fatto però che essi non vengono distrutti implica un possibile rischio di perdita/rilascio a lungo termine.
- **ossidazione con aria umida** - si è rivelata efficace nel distruggere i PCBs e i PAHs; è una tecnologia consolidata per il trattamento dei fanghi e delle acque reflue urbane. È un processo che richiede elevate temperature e pressioni che lo rendono costoso su larga scala.
- **scambio ionico** - tecnologie con scambio cationico possono essere applicate al materiale dragato in relazione alla riduzione del metallo: per essere efficaci è richiesta una selezione dei metalli stessi. Il processo è però reso difficoltoso dalla necessità di regolare il pH e di un lungo tempo di contatto.

5.11.3 Trattamenti biologici

La degradazione biologica mira a migliorare il naturale degrado dei contaminanti organici, rendendoli composti innocui con l'ausilio di microrganismi. Può essere realizzata in sito con la coltivazione o utilizzando un bioreagente. I metalli e le altre sostanze non biodegradabili, non risentono di questa tecnica e, se presenti con un'alta concentrazione possono dare problemi distruggendo la popolazione microbica. L'applicazione per i sedimenti richiede ossigeno; è un processo a bassa velocità che necessita di condizioni ambientali controllate, per parecchie settimane fino all'anno, nel caso di sedimenti fortemente contaminati.

¹¹ prodotto della formazione di un legame tra un atomo o ione centrale e degli atomi, ioni o molecole che circondano l'atomo centrale

5.11.4 Trattamenti termici

Vengono impiegati per rimuovere, distruggere o immobilizzare alcuni tipi di inquinanti, dopo un trattamento di dewatering e essiccazione dei sedimenti. Per operazioni su larga scala è indispensabile una grande quantità di calore. Qualsiasi processo che coinvolge il riscaldamento del materiale è tale da dare luogo a emissioni di sostanze chimiche, che devono essere considerate e controllate opportunamente.

- **desorbimento termico** - il calore viene applicato per volatilizzare e rimuovere i contaminanti organici. Il processo condensa i contaminanti volatilizzati e li raccoglie come residuo oleoso: in questo modo non vengono distrutti ma solamente estratti dai sedimenti. È questa una tecnologia comprovata per rifiuti pericolosi, fanghi e terreni.
- **incenerimento** - il processo, tramite forno rotante, viene eseguito ad alta temperatura ($1\,200^{\circ}\text{C}$) e pressione in modo tale da rimuovere i PCBs e le diossine; le condizioni operative dipendono dalle caratteristiche del contaminante. Questo tipo di tecnologia è disponibile a costi elevati, non distrugge i metalli pesanti, che rimangono concentrati nelle ceneri richiedendo uno smaltimento controllato. In aggiunta, i gas emessi necessitano di un'ulteriore combustione e lavaggio per evitare l'inquinamento dell'aria.
- **immobilizzazione termica** - a circa $1\,400^{\circ}\text{C}$ il sedimento fonde: può essere ottenuta una grande varietà di prodotti controllando il tasso di raffreddamento. Per questo processo è richiesto un trattamento dei fumi e, nonostante il materiale ottenuto venga dichiarato sicuro, esso incontra ostacoli allo sviluppo su larga scala a causa dell'incertezza dei consumatori.

5.11.5 Trattamenti elettrocinetici

Una corrente continua costante applicata ad un terreno saturo contenente dei contaminanti porta gli ioni metallici e gli altri cationi al catodo, mentre gli anioni verso l'anodo. La scelta del materiale per gli elettrodi è importante in quanto il processo rimuove, in aggiunta al metallo stabilito, un numero di altri elementi che dipende dalla loro posizione relativa nella tavola periodica. Il metodo

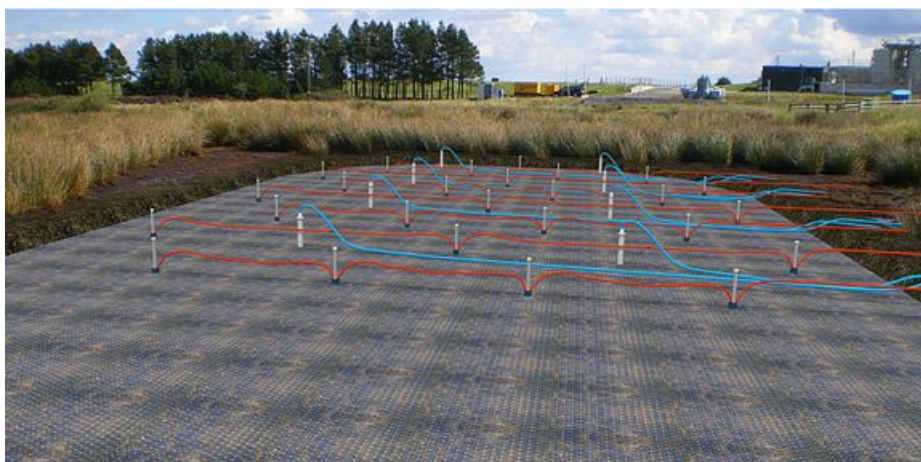


Figura 5.33: Installazione di elettrodi in un bacino per l'elettrocinesi

ha il vantaggio di poter essere utilizzato in sito per rimuovere i metalli pesanti, evitando così speciali trattamenti e contenimenti. Diverse aziende propongono

questa tecnica per la bonifica dei terreni, anche se non è collaudata per i sedimenti marini: la differenza sta nella diversa umidità delle due condizioni. Esistono studi pilota realizzati nel Regno Unito per rimuovere alte concentrazioni di mercurio dai sedimenti nei canali.

5.11.6 Trattamenti di immobilizzazione

Il materiale dragato di consistenza fangosa contenente inquinanti può essere stabilizzato e solidificato aggiungendo un'opportuna quantità di cemento (circa il 5-10 % in peso). Questa tecnica si è dimostrata efficace in relazione a:

- alogenati semivolatili;
- non-alogenati semivolatili e non volatili;
- metalli volatili e non volatili;
- materiali radioattivi (basso livello);
- amianto.

Capitolo 6

Caso di studio I: ripascimento in località Cortellazzo (VE)

6.1 Premessa

Dopo il disastroso evento alluvionale del 4 novembre 1966, che mise in luce la fragilità e la precarietà dell'intero sistema lagunare, fu evidente la necessità di dare vita ad interventi di salvaguardia nella laguna e nella città di Venezia, regolati da quattro Leggi Speciali (L. n. 171/1973, L. n. 798/1984, L. n. 139/1992, L. n. 206/1995). Lo Stato, attraverso il Magistrato alle Acque di Venezia ed il Consorzio Venezia Nuova ha elaborato un piano unitario di interventi articolato secondo linee di azione distinte.

Il cordone litoraneo che separa l'Adriatico dalla laguna, lungo circa 60 chilometri, rappresenta la prima e naturale difesa di Venezia e dei centri urbani lagunari dal mare. Dopo la mareggiata del 1966, il rinforzo dei litorali ha assunto un carattere di assoluta necessità e urgenza. Infatti, esso si è fatto sempre più sottile e fragile a causa della quasi assenza di apporti fluviali, dei processi erosivi, delle azioni disgregatrici del moto ondoso e del vento e del degrado delle strutture storiche in pietra (i *murazzi*) che sono state erette nel corso del XVIII secolo a protezione dalle mareggiate. L'insieme dei fenomeni ha determinato il generale arretramento della linea di costa e la scomparsa del cordone di dune che costituiva un'ulteriore difesa dei territori e degli abitati retrostanti. Il fenomeno è stato particolarmente evidente, fin dai secoli scorsi, nel caso dei litorali di Pellestrina e di Lido per interessare, più recentemente, anche i litorali di Jesolo, Cavallino, Sottomarina e Isola Verde.

Il sistema di opere, ormai per gran parte realizzato, persegue molteplici obiettivi: la protezione della laguna e dei suoi abitati; il ripristino delle difese naturali mediante la creazione di nuove spiagge e l'ampliamento di quelle divenute inadeguate con la formazione, dove possibile, di un nuovo fronte di dune.

Il Magistrato alle Acque di Venezia ha quindi messo in atto una speciale modalità di interventi per il rinforzo dei litorali veneziani: il ripascimento protetto. La difesa di un litorale mediante la costruzione di una nuova spiaggia protetta con dighe in pietrame è senza dubbio la soluzione che, tra quelle possibili, è più compatibile con l'ambiente costiero in quanto ne riprende, anche se in modo artificiale, i caratteri naturali di flessibilità ed adattamento delle spiagge all'energia del moto ondoso. L'ideazione, la progettazione e la realizzazione di queste opere è stata supportata da numerosi approfondimenti di carattere tecnico-scientifico:

- con modelli matematici e fisici stabilendo la dimensione delle celle e il volume

delle sabbie di ripascimento in modo da garantire la profondità di spiaggia sufficiente per dissipare l'energia delle onde, anche in condizione di acqua alta, per burrasche con tempo di ritorno di 300 anni senza tracimazioni significative sopra le arginature costiere;

- con rilievi geofisici e ambientali individuando e caratterizzando anche dal punto di vista ambientale le cave marine definendo le tecniche e le modalità di prelievo per non arrecare danni permanenti alle comunità bentoniche.

Dal 1995 sono stati fatti interventi su sei litorali per un tratto complessivo di 60 Km di costa, apportando circa 9.2 milioni di m^3 di sabbia per l'ampliamento o la ricostruzione delle spiagge; con 8 Km di dune artificiali munite di frangivento ed impianti di ammofile. La forte erosione in atto nel tratto di litorale di Cortellazzo ha messo in evidenza la significativa carenza di apporto sedimentario naturale dal fiume Piave e dal litorale adiacente di Eraclea.

6.2 Inquadramento territoriale

Il litorale di Cortellazzo, lungo circa 2.5 Km, è delimitato a nord-est dalla foce del fiume Piave e a sud-ovest dal litorale di Jesolo. Data la vicinanza con il fiume Piave, il litorale di Cortellazzo risulta essere il naturale e temporaneo deposito dei sedimenti del fiume stesso il quale, essendo a carattere torrentizio apporta quantitativi sedimentari variabili. Il trasporto dei sedimenti nel Piave, come in altri fiumi del Veneto, si è pesantemente ridotto negli ultimi anni per motivi naturali ed antropici, data la presenza di vari serbatoi ad uso principalmente idroelettrico, nella parte montana, e di attività estrattive, nella parte medio-bassa. Di conseguenza, il trasporto litoraneo si è costantemente ridotto nel corso degli anni: la spiaggia di Cortellazzo appare destinata ad erodersi progressivamente.



Figura 6.1: Inquadramento della zona di intervento

6.3 Obiettivi

In concomitanza con i lavori di manutenzione del litorale in zona Jesolo-Cavallino si sono prelevati alcuni campioni di sabbia dalla spiaggia in modo tale da poterli confrontare con quelli prelevati nel sito di dragaggio. Con l'occasione ho potuto assistere ad un ciclo completo di dragaggio e versamento del materiale nella vasca temporanea realizzata sul litorale.

Di particolare interesse risulta l'attenzione posta nelle colonie di bivalvi presenti nella zona di prelievo della draga: prima dell'inizio dei lavori di dragaggio e ripascimento è stata usata un'imbarcazione turbosoffiante in modo da raccogliere le coltivazioni di bivalvi presenti sotto la sabbia, per ricollocarle in un'altra zona.

6.4 Ripascimento mediante TSHD

L'intervento di difesa del litorale di Cortellazzo è atto a prelevare dalla profondità compresa tra -4.5 m e -6.0 m un quantitativo di materiale pari a circa $100\,000\text{ m}^3$, per garantire una larghezza minima di spiaggia. Questo tipo di intervento risulta innovativo per le seguenti ragioni:

- l'area di prelievo del materiale è situata al confine con la zona attiva;
- lo strato prelevato dal fondo mediante dragaggio è di circa 50 cm di spessore

Dal momento che i fenomeni di trasporto longitudinale avvengono prevalentemente nella zona attiva, l'intervento non va ad interferire con il naturale trasporto sedimentologico, grazie al posizionamento dell'area di prelievo al di fuori di tale zona.

Utilizzando un modello di decadimento dell'onda frangente, si è visto come l'area di prelievo non comporta modifiche rilevanti alla condizione di frangimento del moto ondoso: anche se viene a modificarsi l'assetto del profilo naturale con quello dragato, le onde frangono maggiormente oltre l'area di prelievo, non sconvolgendo la posizione dell'breaking line.

La scelta della batimetria -4.5 m e -6.0 m , permette di dragare del materiale con caratteristiche granulometriche e di colorazione del tutto simili a quelle del materiale presente sulla spiaggia, come si vedrà nelle prossime sezioni. Essendo questa però una fascia caratterizzata dalla presenza di colonie di molluschi bivalvi, è stato necessario effettuare anche un intervento di tipo ambientale per la loro salvaguardia, tramite l'impiego di motopesca appositi per prelevare e riposizionarle in un altro ambiente (sezione 6.5).

Per il dragaggio e successivo ripascimento è stata utilizzata una draga idraulica aspirante semovente a strascico (TSHD). La sequenza delle operazioni necessarie viene descritta sul seguito:

1. Posizionamento elinda: viene portata la nave, con la tramoggia vuota, verso l'area di dragaggio, e qui viene abbassata la testa aspirante, la cui posizione viene istantaneamente rilevata a bordo grazie ad un sistema DGPS. Il materiale aspirato va a riempire lentamente la tramoggia.
2. Riempimento della tramoggia: il materiale prelevato per mezzo delle pompe aspiranti viene riversato all'interno della tramoggia attraverso un diffusore mobile in grado di distribuire la miscela di acqua e sabbia in diversi punti della tramoggia stessa.
3. Trasporto del materiale: riempita la tramoggia, occorre posizionare la nave nel punto di allacciamento con la condotta per il successivo refluimento.
4. Refluimento del materiale: tramite un sistema di condotte, il materiale viene prelevato dalla tramoggia mediante ulteriori pompe di aspirazione e fatto refluire sul litorale con l'ausilio di un diffusore a becco d'anatra, per distribuire la miscela con un raggio d'azione più ampio rispetto ad un normale sbocco circolare. Nel tratto di spiaggia in cui viene effettuato il ripascimento, viene

realizzata a mezzo di escavatori terrestri un'arginatura per la decantazione del materiale: dei tubi precedentemente installati permettono infatti all'acqua in eccesso di uscire.

(a) *Diffusore*(b) *Inizio riempimento vasca*

Figura 6.2: Fase di refluentamento

5. Svuotamento della tramoggia: il materiale viene disgregato con dei getti d'acqua in modo da aumentare la sospensione e facilitare l'aspirazione da parte delle pompe.

6.5 Intervento ambientale: salvaguardia delle colonie bentoniche

La pesca di molluschi bivalvi (vongole principalmente) è condotta con l'impiego di motopesca dotati di draga idraulica, un attrezzo da pesca che penetrando nel sedimento per qualche centimetro è in grado di raccogliere gli organismi presenti. L'attrezzo è costituito da una gabbia a forma di parallelepipedo in tondini metallici, con una lama per tagliare il sedimento ed un sistema per inviare acqua in pressione agli ugelli presenti in vari punti dell'attrezzo stesso. Giunti nell'area di pesca la gabbia, posizionata a prua dell'imbarcazione, viene calata sul fondale, si aziona il getto d'acqua in pressione e si inizia l'azione di dragaggio procedendo in retromarcia (pesca delle vongole) o recuperando il cavo dell'ancora precedentemente filato per 200-300 m (pesca dei fasolari e dei cannicicchi). Nonostante le modalità di pesca simili, sono presenti alcune differenze sostanziali: in relazione alle specie bersaglio varia la selettività dell'attrezzo (luce dei tondini), la profondità di penetrazione nel sedimento, la velocità di traino dell'attrezzo, le modalità di selezione del pescato (manuale o con vibrovaglio), la durata delle pescate, etc. Per le indagini

(a) *motopesca*(b) *sacco campionatore*

Figura 6.3: Esempio di draga idraulica

preliminari, il motopesca viene dotato di un sacco in rete (campionatore o cover) posizionato nel grigliato di tondini in acciaio. Il sacco campionatore possiede una rete con maglia fitta (4 mm di lato), tale da consentire anche la raccolta di buona parte della porzione di prodotto avente taglia inferiore al limite commerciale ed è fissato ad un telaio rigido con apertura nota (27 cm) ed altezza adeguata alle dimensioni dell'attrezzo. Le pesche sono state effettuate trainando in retromarcia la draga calata sul fondale marino, sistema attualmente utilizzato dai pescherecci che praticano la pesca di *Chamelea gallina* per motivi legati alla semplificazione delle manovre, alla maggior sicurezza di bordo e ad una miglior efficienza nel gestire la giornata di pesca. Nel corso del campionamento, ciascuna pescata è stata georeferita con GPS e strumentazione di bordo (radar ed ecoscandaglio), e si è protratta per circa 4 minuti. Per le stazioni più significative è stato raccolto e conservato un campione costituito dal pescato presente nel cover. I campioni raccolti sono stati pesati con dinamometro digitale (portata max. 30 kg, precisione 20 g) e posti in contenitori numerati (sacchi in rete e/o plastica). Il prodotto presente nella rimanente porzione della draga è stato setacciato direttamente a bordo dell'imbarcazione per mezzo di un vibrovaglio, dotato di griglie selezionatrici con tondini in metallo di luce 21,5 mm e 18 mm, in modo da separare la frazione commerciale (≥ 25 mm) da quella sub-commerciale (indicativamente compresa tra 20 e 24 mm), e pesato con dinamometro digitale (portata max. 30 Kg, precisione 20 g), così da valutare i quantitativi di prodotto pronta-pesca e sub-commerciale.

6.6 Analisi granulometrica

Per riconoscere qualitativamente una terra e per denotarne in modo approssimato le caratteristiche meccaniche, vengono utilizzate le prove di classificazione, le cui modalità sono regolate dalle varie normative (CNR-UNI, ASTM, BRITISH STANDARD) in modo tale che i risultati possano essere facilmente confrontati. A seconda della natura della terra da esaminare viene adottata la più adatta prova di classificazione: le terre non coesive vengono classificate solo in base alla granulometria mentre quelle coesive, il cui comportamento meccanico è influenzato dal contenuto d'acqua, vengono classificate sia per granulometria che per prove con vari gradi di umidità.

L'analisi granulometrica permette di individuare la distribuzione percentuale in peso dei grani, tramite due metodologie di prova da eseguire in laboratorio:

- **vagliatura meccanica:** viene eseguita su terre con dimensione dei grani superiore a 0.075 mm. I risultati vengono riportati in un diagramma semilogaritmico ottenendo la *curva granulometrica*: ogni punto indica la percentuale di passante al setaccio D, se D è la dimensione della maglia del setaccio. Il campione viene essiccato in forno prima della vagliatura e passato in un mortaio, per rompere gli eventuali grumi presenti. Per eseguire in modo corretto la prova occorre disporre di una corretta quantità di materiale, che viene determinata sulla base della dimensione dei grani più grossi presenti in percentuale maggiore del 10 %. Per la prova si utilizza una serie di setacci e crivelli: contenitori il cui fondo è costituito da una rete metallica a maglia quadrata nel primo caso, e da fori circolari nel secondo. Nella tabella 6.1 sono riportati i setacci a cui fanno riferimento la normativa italiana, americana e inglese.
- **analisi per sedimentazione o aerometria:** viene eseguita su frazioni di terra passanti al setaccio UNI 0.075 ed è basata sulla legge di Stokes in merito

alla velocità di caduta di una particella sferica in un fluido. Nell'elaborazione numerica dei dati sperimentali, i grani reali vengono considerati fittizi, di diametro D' , caratterizzati dalla stessa velocità di deposizione del fluido. Si segue lo sviluppo della sedimentazione partendo dal presupposto che il peso di volume iniziale della sospensione acqua-terra è maggiore di quello della sola acqua. La prova viene eseguita tramite un aerometro costituito inferiormente da un bulbo e superiormente da uno stelo graduato: col passare del tempo lo strumento risulta sempre più immerso, a causa della diminuzione del peso di volume della sospensione.

CNR - UNI		ASTM		BRITISH STANDARD	
n.	apertura mm	n.	apertura mm	n.	apertura mm
100	100	3"	76.2	75	75
71	71	2"	50.8	63	63
60	60	1.5"	38.1	50	50
40	40	1"	25.4	37.5	37.5
25	25	3/4"	19.1	28	28
15	15	1/2"	12.7	20	20
10	10	3/8"	9.52	14	14
5	5	4	4.76	10	10
2	2	8	2.36	6.3	6.3
1	1	10	2.00	5	5
0.425	0.425	16	1.18	3.35	3.35
0.180	0.180	20	0.84	2	2
0.075	0.075	30	0.60	1.18	1.18
		40	0.42	0.60	0.60
		50	0.30	0.425	0.425
		60	0.25	0.30	0.30
		80	0.18	0.212	0.212
		100	0.15	0.15	0.15
		140	0.105	0.063	0.063
		200	0.074		

Tabella 6.1: Tabella dei setacci relativi alla normativa italiana, americana ed inglese

6.6.1 Vagliatura meccanica per via secca

Dopo aver asciugato in forno il campione di terra, questo viene pesato (P_t). La serie di setacci viene disposta in verticale, con aperture crescenti dal basso verso l'alto, ed il campione posizionato su quello superiore. La pila è chiusa sul fondo ed in sommità per evitare di disperdere del materiale. Si procede quindi con la vagliatura, a mano o con scuotitore meccanico; l'operazione termina quando, per ogni frazione di terra trattenuta, non si rileva più una quantità apprezzabile di passante. Viene quindi pesato ciascun trattenuto ad ogni setaccio ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$). Le aliquote di trattenuto ai singoli setacci si ottengono dividendo T_i (con $i = 1, 2, \dots, n$) per il peso totale iniziale P_t . La percentuale di terra passante per l' i -esimo setaccio è data dalla 6.1

$$P_i(\%) = \frac{P_t - (T_1 + T_2 + \dots + T_i)}{P_t} \cdot 100 \quad (6.1)$$

(Favaretti e Mazzucato 1989)



(a) setacci



(b) forni

Figura 6.4: Apparecchiature del dipartimento ICEA, sede GEOMAR, dell'Università degli Studi di Padova

6.7 Prelievo e campionamento nella zona oggetto di studio

Nell'ambito del progetto *Manutenzione dei litorali di Jesolo e Cavallino-Treporti* sono state prelevate il giorno 30 maggio delle sabbie dalla batimetrica $-4.5\text{ m}/-6\text{ m}$, per caratterizzarle ai fini del deposito temporaneo e successivo utilizzo, (6.7).

Le aree oggetto d'indagine sono state:

- litorale destinato al ripascimento in località Pineta di Cortellazzo;
- zona di prelievo situata nei pressi di una barra sabbiosa, nel tratto di mare prospiciente la località Pineta di Cortellazzo.

Prelievi lungo gli arenili Per il prelievo dei sedimenti lungo l'arenile sede di ripascimento è stato utilizzato un campionatore a pareti grosse in PVC atossico con scarpa seghettata da 4 pollici (6.5).



Figura 6.5: Campionatore utilizzato per il prelievo

Prelievo nell'area marina Per il prelievo dei sedimenti nell'area marina anti-stante la pineta di Cortellazzo presso l'area di prelievo delle sabbie da destinare a ripascimento dell'arenile, è stato utilizzato un campionatore tipo *Shelby*, caratterizzato da un cilindro d'acciaio ($\varnothing = 50\text{ mm}$ e lunghezza 2000 mm) a pareti sottili (1.6 mm), con scarpa tagliente. L'infissione del campionatore è avvenuta in

un'unica tratta mediante una testa vibrante (tipo vibrocorer), solidale al carotiere e collegata ad una centralina oleodinamica. La testa è munita di valvola di sfogo che permette la fuoriuscita di acqua durante la perforazione e trattiene il sedimento all'interno della fustella durante il recupero (6.6).

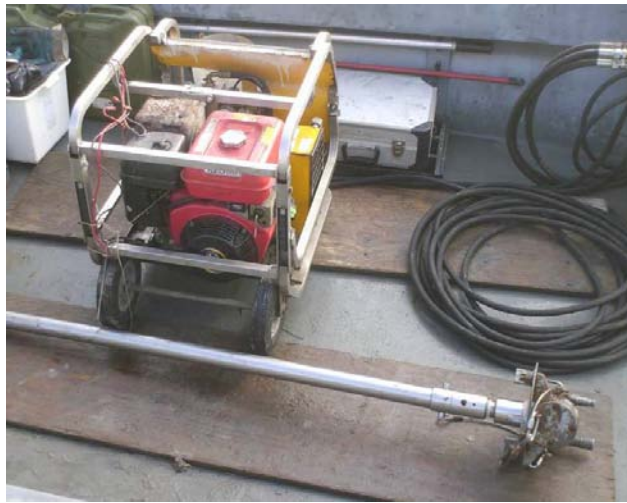


Figura 6.6: Campionatore di tipo *Shelby*

La procedura adottata permette di ottenere carote continue e indisturbate di sedimenti normal-consolidati saturi di acqua ed evita il surriscaldamento del terreno causato da una metodologia a rotazione. Il natante utilizzato per i campionamenti è provvisto di un braccio in acciaio (munito di argano controllato dalla centralina oleodinamica); questa struttura consente di calare in acqua il campionatore e di recuperarlo a bordo dopo l'infissione nei sedimenti del fondale. Il posizionamento delle verticali indagate è stato realizzato tramite ricevitore GPS Ashtech Promark II, dotato di sistema di acquisizione del segnale Waas/Egnos. Questo sistema consente una *correzione differenziale* attraverso una serie di basi a terra, che rinviando il segnale a specifici satelliti che fanno parte del sistema.

6.8 Analisi granulometrica dei campioni

È stata quindi effettuata un'analisi granulometrica per vagliatura meccanica a secco nel laboratorio di geotecnica del dipartimento GEOMAR dell'Università degli Studi di Padova, essiccando prima i campioni in forno e passandoli poi in un mortaio per rimuovere i grumi presenti senza alterare la granulometria del materiale. Nelle tabelle seguenti sono riportate le analisi per ogni campione e quindi la percentuale di passante per ogni vaglio.

Dall'analisi delle curve granulometriche si può notare come i primi quattro campioni, provenienti da cava marina presentino maggiormente caratteristiche di sabbia fine con presenza di sabbia media, mentre il quinto campione, proveniente da cava terrestre, risulta per lo più costituito da sabbia medio-fine.

Si può giungere alla conclusione che la sabbia prelevata nel sito di dragaggio è sostanzialmente uguale a quella presente nel litorale; ciò è dovuto al fatto che il materiale eroso dalla spiaggia per effetto delle onde, viene depositato non molto lontano dalla stessa. Il ripascimento quindi riporta a terra lo stesso materiale eroso, senza la necessità di fare ulteriori trattamenti.



Figura 6.7: Aree di prelievo nella zona di intervento tra Jesolo e Cortellazzo

Analisi granulometrica				
Campione n. 1, cava marina				
Peso lordo: 250.6 g				
Peso tara: 100.0 g				
Peso netto: 150.6 g				
Vaglio n.	D vaglio mm	Peso netto g	% trattenuto	% passante
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.4		0.00	100.00
3/4"	19.1		0.00	100.00
1/2"	12.7		0.00	100.00
3/8"	9.52		0.00	100.00
4	4.76		0.00	100.00
10	2		0.00	100.00
20	0.84		0.00	100.00
40	0.42	0.3	0.20	99.80
60	0.25	0.5	0.33	99.47
80	0.177	4.8	3.19	96.28
140	0.105	84.5	56.11	40.17
200	0.074	55.6	36.92	3.25
D₅₀: 0.120 mm				

Tabella 6.2: Analisi granulometrica del campione n. 1

Analisi granulometrica				
Campione n. 2, cava marina				
Peso lordo: 202.1 g				
Peso tara: 100.0 g				
Peso netto: 102.1 g				
Vaglio n.	D vaglio mm	Peso netto g	% trattenuto	% passante
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.4		0.00	100.00
3/4"	19.1		0.00	100.00
1/2"	12.7		0.00	100.00
3/8"	9.52		0.00	100.00
4	4.76		0.00	100.00
10	2		0.00	100.00
20	0.84		0.00	100.00
40	0.42		0.00	100.00
60	0.25	4.6	4.51	95.49
80	0.177	14.4	14.10	81.39
140	0.105	43.9	43.00	38.39
200	0.074	34.1	33.40	5.00
D₅₀: 0.130 mm				

Tabella 6.3: Analisi granulometrica del campione n. 2

Analisi granulometrica				
Campione n. 3, cava marina				
Peso lordo: 180.8 g				
Peso tara: 100.0 g				
Peso netto: 80.8 g				
Vaglio n.	D vaglio mm	Peso netto g	% trattenuto	% passante
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.4		0.00	100.00
3/4"	19.1		0.00	100.00
1/2"	12.7		0.00	100.00
3/8"	9.52		0.00	100.00
4	4.76		0.00	100.00
10	2		0.00	100.00
20	0.84		0.00	100.00
40	0.42	2.2	2.72	97.28
60	0.25	2.8	3.47	93.81
80	0.177	9.8	12.13	81.68
140	0.105	36.0	44.55	37.13
200	0.074	26.0	32.18	4.95
D₅₀: 0.125 mm				

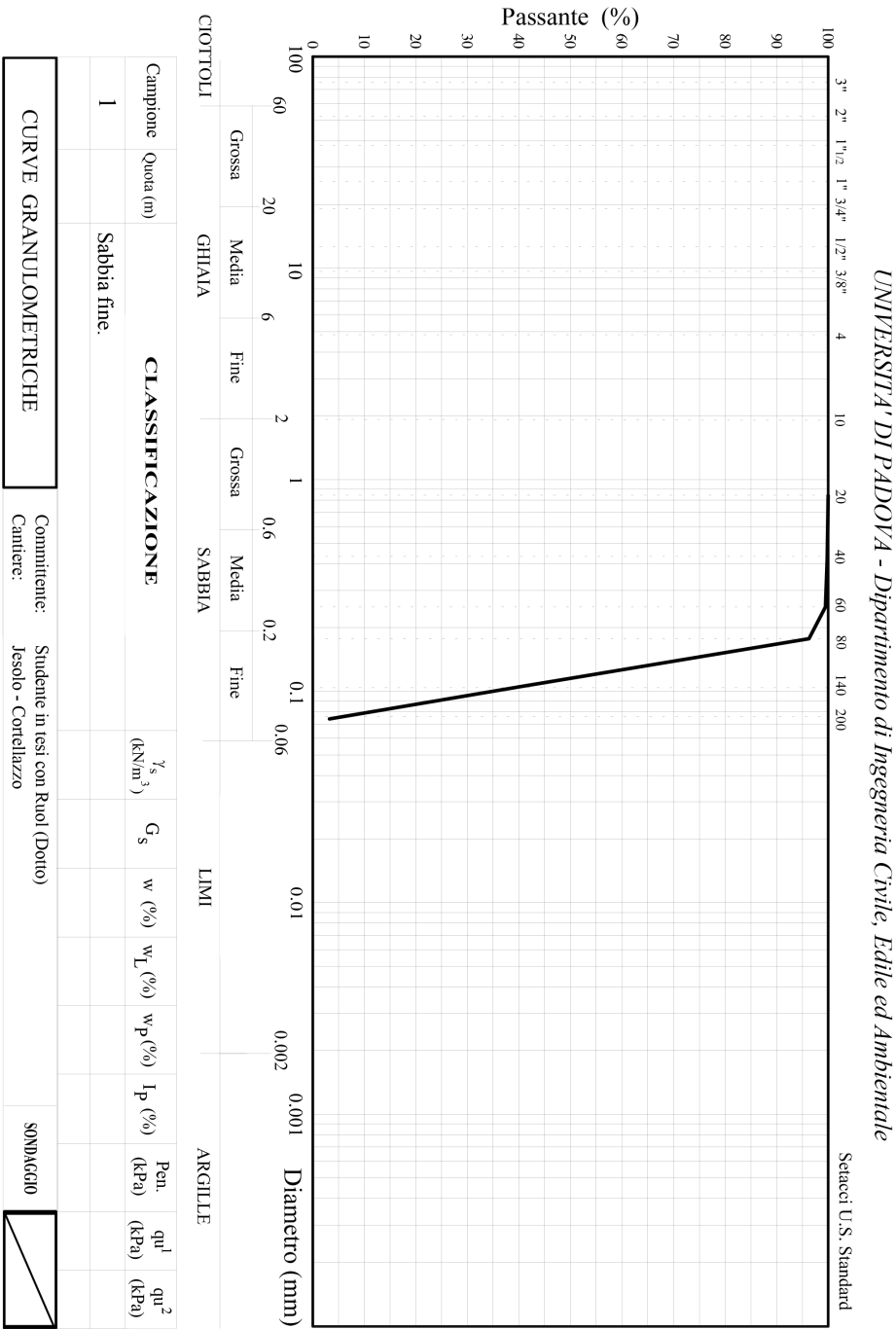
Tabella 6.4: Analisi granulometrica del campione n. 3

Analisi granulometrica				
Campione n. 4, cava marina				
Peso lordo: 181.5 g				
Peso tara: 100.0 g				
Peso netto: 81.5 g				
Vaglio n.	D vaglio mm	Peso netto g	% trattenuto	% passante
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.4		0.00	100.00
3/4"	19.1		0.00	100.00
1/2"	12.7		0.00	100.00
3/8"	9.52		0.00	100.00
4	4.76		0.00	100.00
10	2		0.00	100.00
20	0.84		0.00	100.00
40	0.42	1.7	2.09	97.91
60	0.25	1.9	2.33	95.58
80	0.177	8.2	10.06	85.52
140	0.105	41.8	51.29	34.23
200	0.074	23.6	28.96	5.28
D₅₀: 0.130 mm				

Tabella 6.5: Analisi granulometrica del campione n. 4

Analisi granulometrica				
Campione n. 5, cava terrestre				
Peso lordo: 183.8 g				
Peso tara: 100.0 g				
Peso netto: 83.8 g				
Vaglio n.	D vaglio mm	Peso netto g	% trattenuto	% passante
4"	101.6		0.00	100.00
3"	76.2		0.00	100.00
2"	50.8		0.00	100.00
1" 1/2	38.1		0.00	100.00
1"	25.4		0.00	100.00
3/4"	19.1		0.00	100.00
1/2"	12.7		0.00	100.00
3/8"	9.52		0.00	100.00
4	4.76		0.00	100.00
10	2		0.00	100.00
20	0.84		0.00	100.00
40	0.42	0.2	0.24	99.76
60	0.25	3.8	4.53	95.23
80	0.177	43.7	52.15	43.08
140	0.105	31.3	37.35	5.73
200	0.074	1.2	1.43	4.30
D₅₀: 0.190 mm				

Tabella 6.6: Analisi granulometrica del campione n. 5



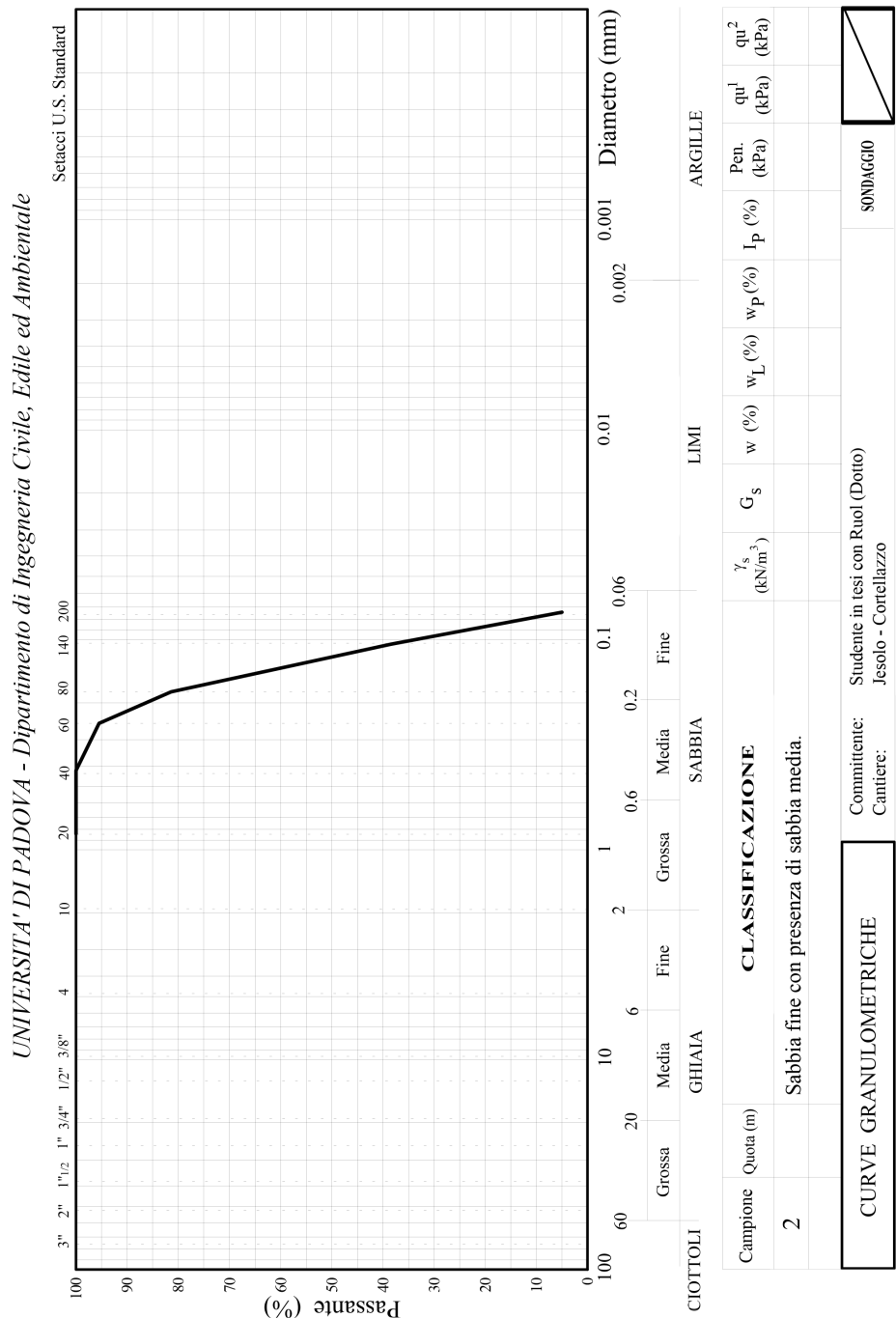


Figura 6.9: Curva granulometrica campione 2

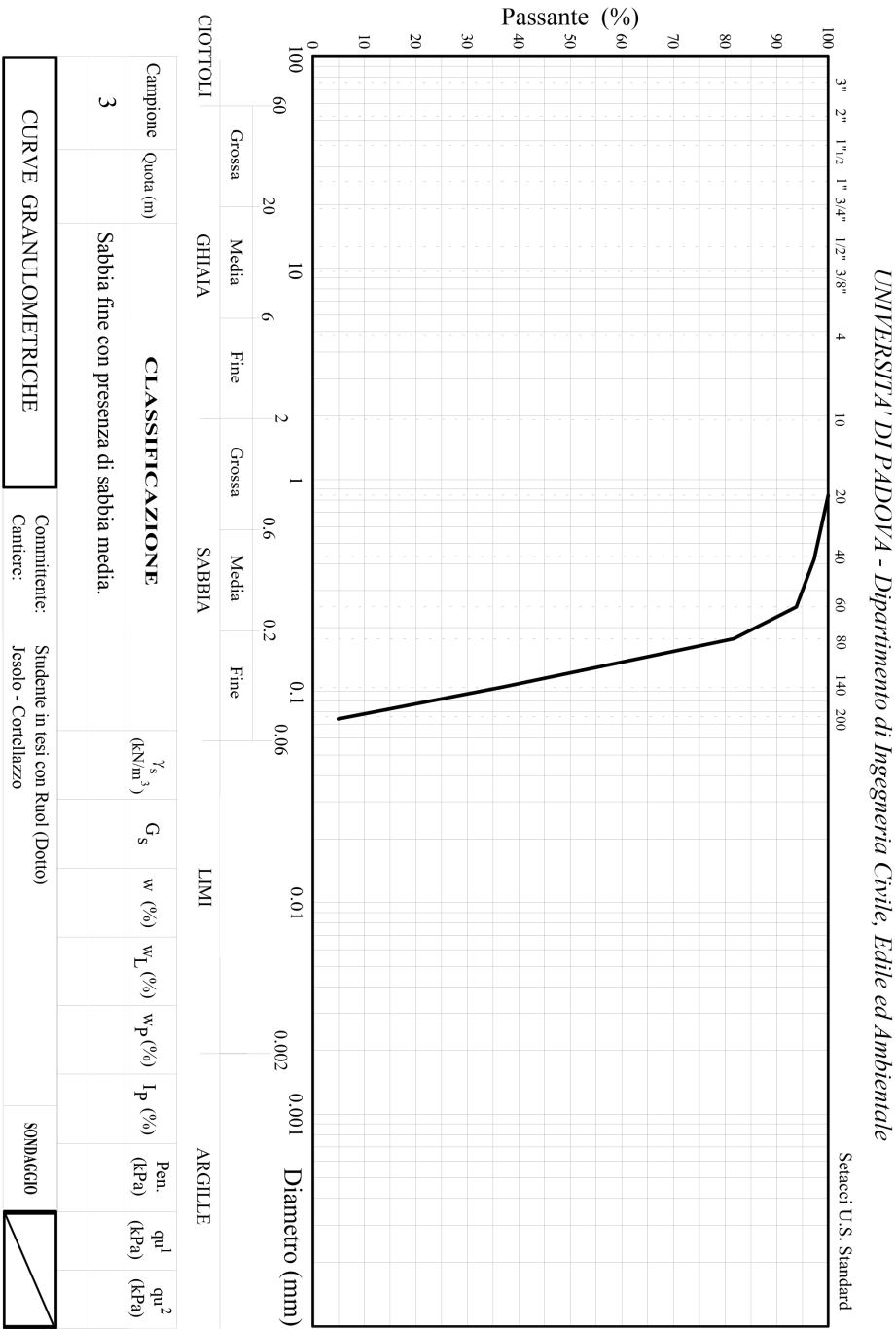
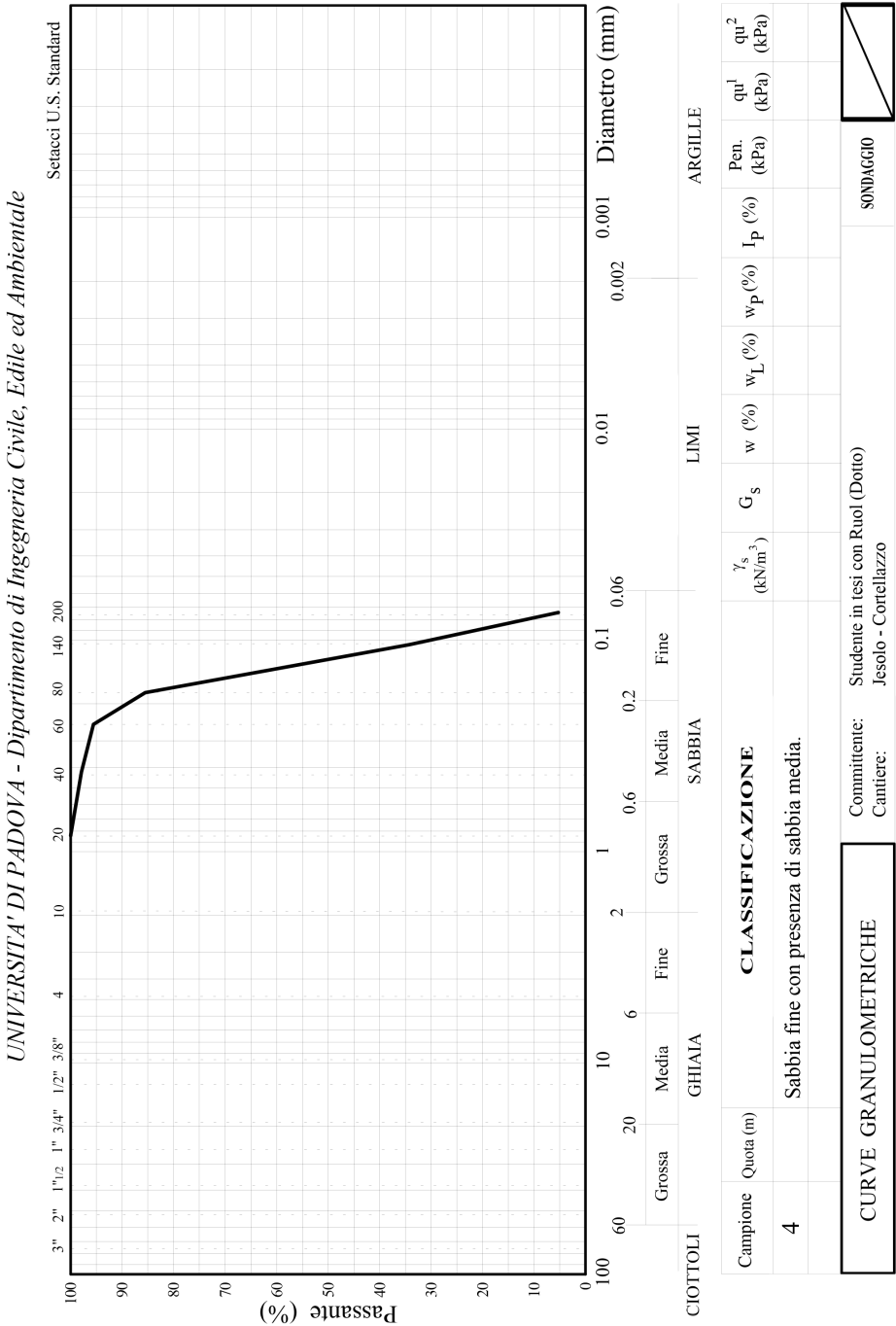


Figura 6.10: Curva granulometrica campione 3



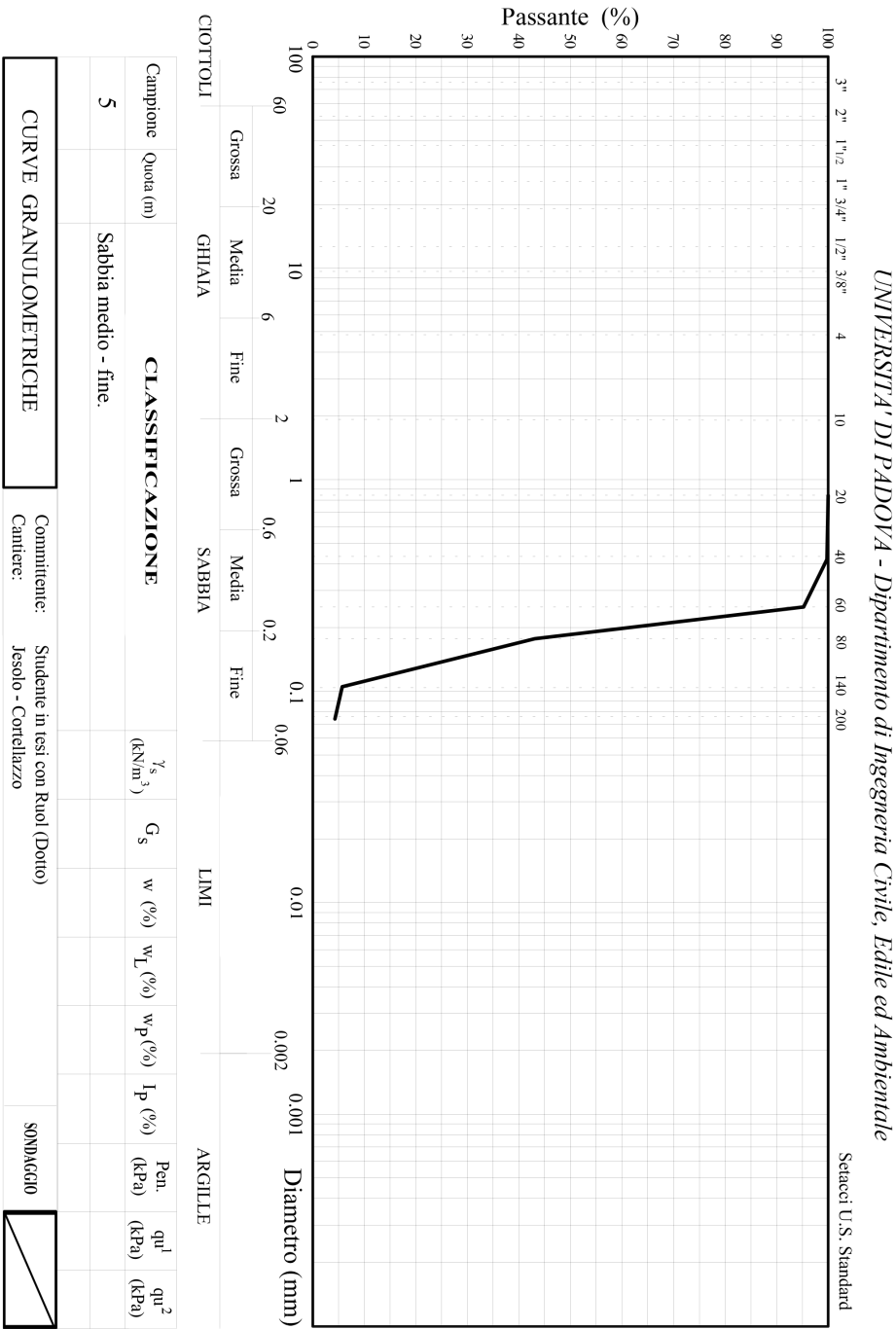


Figura 6.12: Curva granulometrica campione 5

Capitolo 7

Caso di studio II: dragaggio canaletta di accesso al Porto di Lido e refluento in barena S.Felice

7.1 Premessa

Uno dei principali obiettivi degli interventi di salvaguardia della Laguna di Venezia è arrestare ed invertire i processi di erosione e di degrado morfologico riguardanti le tipiche aree di transizione lagunari (velme, secche, barene e canneti), con l'applicazione di una serie di tecniche protettive a basso impatto ambientale. Il fine è dunque sia il mantenimento di adeguate superfici intertidali, sia il mantenimento ed il ripristino degli habitat tipici lagunari.

Le barene sono terre quasi sempre emerse, ma con una quota compresa nel campo di escursione medio della marea e dunque soggette spesso ad allagamenti. Esse svolgono alcune funzioni fondamentali per l'equilibrio ambientale della laguna: frenano il moto ondoso e inducono notevoli benefici sull'idrodinamica. Creano infatti percorsi obbligati alle correnti d'acqua guidando la propagazione della marea in laguna e amplificando l'azione dei canali. Infine hanno un effetto depurante sull'acqua grazie alla vegetazione alofila, cui offrono l'habitat ideale.

Le velme sono terre che emergono solo in occasione delle basse maree. Costituiscono un habitat importantissimo per l'alimentazione di particolari specie di uccelli e ospitano organismi acquatici resistenti a temporanee emersioni.

I bassifondi sono aree adiacenti ai canali, con quota del suolo inferiore al livello

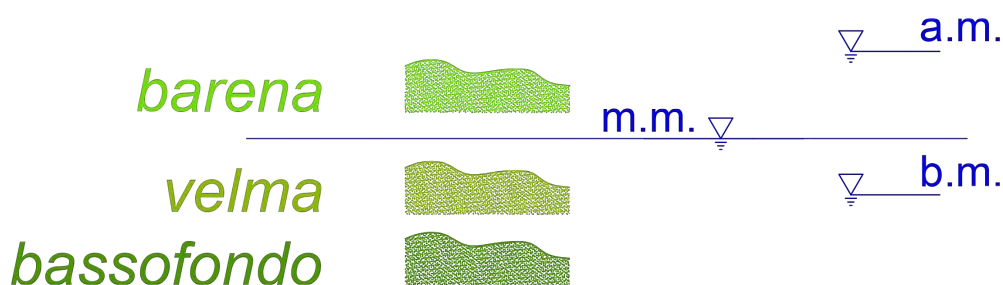


Figura 7.1: Differenza tra barena, velma e bassofondo in funzione del livello di marea

medio del mare. Nel ventennio 1970-1990, essi si sono approfonditi mediamente di 7 millimetri l'anno e, in alcune zone, anche di 30 millimetri.

Tra le aree di maggior pregio della Laguna nord tutto il sistema intertidale compreso tra i canali di S. Antonio, della Dossa - Dolce, Burano e S. Felice rappresenta uno degli ambienti in cui le componenti morfologiche (barene, secche velme paludi ghebi e canali) ed ambientali sono ancora in certa misura riconoscibili e strutturate, anche se i meccanismi accrescitivi risultano svantaggiati rispetto ai fenomeni erosivi.

Tutti i margini barenali hanno subito, nel corso degli ultimi 70 anni, rilevanti regressioni, con percentuali differenti a seconda dell'esposizione ai fattori erosivi, antropici (moto ondoso da natante) o naturali (correnti e vento) con un tasso medio annuo che si aggira attorno a valori di alcuni decimetri all'anno, in alcuni tratti anche con valori superiori al metro. Questa regressione ha causato la disgregazione e frammentazione di intere unità barenali modificando la funzionalità idraulica del sistema e mettendo in diretto collegamento i canali principali con le paludi retrostanti.

A questo si è sommata la progressiva scomparsa del sistema delle velme retrostanti dovuta sia alla progressiva esposizione alle onde ed alle correnti di marea, sia alla mancanza degli apporti sedimentari e alla riduzione delle comunità bentoniche stabilizzanti.

L'esposizione ai processi erosivi è aumentata nel corso dell'ultimo secolo a causa della crescita del livello del mare per eustatismo e della subsidenza. L'aumento della profondità dei fondali conduce allo sviluppo di onde da vento e correnti più intense, a cui si aggiunge una limitata crescita delle comunità che stabilizzano il fondale a causa della ridotta esposizione alla luce (in seguito all'incremento della torbidità e profondità delle acque). Il processo di degrado idro-morfologico e biologico è inoltre accelerato dalle numerose retroazioni presenti nel sistema; al processo erosivo iniziale si accompagna infatti una maggiore erodibilità per perdita di compattezza.

L'intervento qui descritto persegue un duplice scopo: il dragaggio di manutenzione della canaletta di accesso al Porto di Lido, necessario per mantenere la profondità di progetto per la navigazione, e l'intervento ambientale legato al refluimento del materiale dragato nella barena di San Felice. Gli obiettivi dell'intervento si possono allora così riassumere:

- il mantenimento della profondità navigabile della canaletta di accesso al Porto di Lido, utile anche al transito dei cassoni necessari alla realizzazione del *Mose*;
- il mantenimento di adeguate forme lagunari, mediante il ripristino degli habitat tipici, o parti di essi, molto degradati e ad alto rischio di scomparsa;
- il ripristino della funzionalità idraulica, ricreando le strutture e i margini barenali scomparsi o consolidando quelli in forte erosione, garantendo quindi la vivificazione delle aree interne maggiormente confinate.

7.2 Ambito territoriale

L'area di progetto si sviluppa, per la parte relativa al dragaggio, in prossimità dell'accesso al porto del Lido o porto di San Nicolò: l'accesso settentrionale alla laguna di Venezia, a nord di quelli di Malamocco e Chioggia. È situato tra Punta Sabbioni e l'isola del Lido ed è il principale accesso al porto di Venezia per il

traffico passeggeri e per i traghetti. Il porto, è attualmente protetto da due lunghe dighe foranee, anche se sono in corso massicci lavori di risistemazione nell'ambito del progetto Mose che ne modificheranno radicalmente l'aspetto, con la creazione di una terza diga in mare aperto, di un'isola artificiale e di un bacino laterale per consentire l'accesso anche quando saranno in funzione gli sbarramenti contro le acque alte. L'attuale conformazione della bocca di porto è frutto della progressiva formazione della lunga penisola-lido di Punta Sabbioni, a seguito della deviazione del corso dei fiumi Sile e Piave, le cui foci vennero allontanate dalla Repubblica di Venezia per prevenire l'interramento della parte settentrionale della laguna.



Figura 7.2: Localizzazione area di progetto - dragaggio

Per quanto riguarda invece la parte ambientale del progetto, l'area di intervento si localizza lungo il tratto centrale del canale S. Felice (figura 7.3) e costituisce soprattutto nel periodo estivo una via di transito per i natanti, essa è infatti la principale arteria per raggiungere le aree più interne della Laguna nord. Gli interventi di ripristino delle funzionalità del sistema di velme e barene interessano i margini ovest del Canale S. Felice nel tratto compreso tra Treporti e Isola Salina. Nella tabella 7.1 sono riportate le coordinate Piane Gauss Boaga e Geografiche Roma 40 della Barena di San Felice.

Il sistema di barene a valle del complesso insulare di Burano, Mazzorbo e Torcello rappresenta uno degli ambienti caratteristici della Laguna Nord dominata dalle barene di canale lagunare di origine mareale, in cui le componenti morfologiche (barene, velme paludi ghebi e canali) ed ambientali, mantengono strutture e processi corrispondenti a quelli primari anche se attualmente in parte modificati dall'azione antropica. Tali ambienti, descritti anche come *strutture di delta di marea*, erano fino alla fine dell'800 fortemente soggetti all'influenza degli apporti sedimentari provenienti dalla bocche di Lido, S. Erasmo e Treporti. Con la realizzazione dei moli foranei e l'unificazione delle tre bocche di porto nella bocca di porto di Lido, è venuta progressivamente a mancare la ricarica di sedimenti marini (da $300\,000\text{ m}^3/\text{anno}$ si è ridotta a $30\,000\text{ m}^3/\text{anno}$) che compensava i fenomeni erosivi causati principalmente da vento e correnti. A partire dagli anni '70 a questi fenomeni naturali si sono aggiunti, in maniera sempre più invasiva, gli effetti

		Piane Gauss Boaga		Geografiche Roma 40 - da autocad		Geografiche Roma 40 - da bing
1	N	5041050.2253	ϕ	45° 29' 38.5909"	ϕ	45.494773°
	E	2322116.2679	λ	12° 28' 03.0649"	λ	12.467233°
2	N	5040949.7397	ϕ	45° 29' 35.3457"	ϕ	45.493802°
	E	2322123.7546	λ	12° 28' 03.5554"	λ	12.467351°
3	N	5040851.2846	ϕ	45° 29' 32.1330"	ϕ	45.492879°
	E	2322098.7291	λ	12° 28' 02.5465"	λ	12.466702°
4	N	5040810.5925	ϕ	45° 29' 30.8220"	ϕ	45.492495°
	E	2322104.8091	λ	12° 28' 02.8854"	λ	12.466906°
5	N	5040760.3006	ϕ	45° 29' 29.2388"	ϕ	45.492052°
	E	2322148.7616	λ	12° 28' 04.9813"	λ	12.467775°
6	N	5040709.1964	ϕ	45° 29' 27.6055"	ϕ	45.491578°
	E	2322169.3480	λ	12° 28' 06.0029"	λ	12.468011°
7	N	5040629.5534	ϕ	45° 29' 25.0375"	ϕ	45.490916°
	E	2322179.3092	λ	12° 28' 06.5770"	λ	12.468001°
8	N	5040573.8030	ϕ	45° 29' 23.2857"	ϕ	45.490487°
	E	2322231.1094	λ	12° 28' 09.0419"	λ	12.468376°
9	N	5040567.8300	ϕ	45° 29' 23.1648"	ϕ	45.490367°
	E	2322302.1680	λ	12° 28' 12.3209"	λ	12.469588°
10	N	5040601.0146	ϕ	45° 29' 24.2871"	ϕ	45.490690°
	E	2322349.3191	λ	12° 28' 14.4429"	λ	12.470436°
11	N	5040634.5330	ϕ	45° 29' 25.4890"	ϕ	45.491066°
	E	2322463.9450	λ	12° 28' 19.6698"	λ	12.471627°

Tabella 7.1: Coordinate barena

dovuti all'innalzamento del livello del mare e del moto ondoso da natante che hanno provocato una fortissima accelerazione nell'erosione delle sponde barenali prospicienti alle aste principali. Quei pochi sedimenti che oggi arrivano dalla bocca non sono più in grado di compensare il processo erosivo delle barene adiacenti ai canali principali e che mediamente è di circa $0,5 \div 1 \text{ m}$ all'anno.

Assieme alla scomparsa delle superfici barenali, i fenomeni erosivi comportano l'arretramento, e in alcuni casi la completa cancellazione, di intere fasce vegetate.

La presenza di numerosi habitat d'interesse e di specie animali e vegetali particolarmente rare ha portato, nell'ambito del progetto Natura 2000 (Direttiva *Habitat* dell'Unione Europea n. 43 del 1992) a tutela della conservazione della diversità biologica, all'individuazione di aree di particolare pregio ambientale denominate Siti di Importanza Comunitaria (SIC), ai quali si sono aggiunte le Zone di Protezione Speciale (ZPS), previste dalla Direttiva *Uccelli* n. 409 del 1979. Attualmente le aree SIC in Laguna di Venezia sono quattro, mentre le cinque aree ZPS definite nel 2003 sono state recentemente ampliate e accorpate in un'unica area *Laguna di Venezia*.

7.3 Inquadramento territoriale

L'area di progetto è ubicata ad est di Burano, nel bacino settentrionale della Laguna, ed è direttamente interessata dal Canale di Treporti - San Felice che proviene direttamente dalla bocca di porto di Lido e che si ramifica con assi secondari tra le barene. Essa rientra nell'ambito delle *barene*, *velme*, *paludi*



Figura 7.3: Localizzazione area di progetto - riversamento

e *bassofondali di origine mareale* caratterizzate da tipici profili e associazioni vegetali alofile soggette a continue alterazioni morfologiche e strutturali, dovute principalmente al moto ondoso che ne ha demolito i margini. Sono individuabili tre tipologie di ambienti:

- barene di *bordo canale*, caratterizzate da quote degradanti più elevate a ridosso del margine del canale o dei ghebi principali. Le quote si fanno via via più basse allontanandosi dal canale o dalle sue ramificazioni periferiche fino al limite con le velme;
- velme (tidal flats) che emergono solo in bassa marea, colonizzate, a seconda della quota, dell'esposizione e del confinamento, da fanerogame marine, alghe, molluschi bivalvi, crostacee diatomee (che oltre a rappresentare elementi di pregio e biodiversità, costituiscono strutture che proteggono i fondali fangosi dall'erosione delle onde e delle correnti);

- bassofondali , sempre sommersi, caratterizzati da una comunità biotica più varia ed eterogenea.

L'area è soggetta ad intensi fenomeni erosivi che interessano sia i margini barenali sia le velme, che mostrano una progressiva perdita di quota. Tali fenomeni sono più intensi nelle zone direttamente esposte ai venti di nord-est (bora) e di sud-est (scirocco) a causa della notevole ampiezza dei fetch che si vengono a creare. Il Piano della Laguna e dell'Area Veneziana (Regione del Veneto, 1999) introduce una pianificazione unitaria della laguna, stabilendo che nell'area in esame sono consentite operazioni di conservazione, tutela, ripristino e recupero degli ambienti lagunari in particolare delle barene, delle velme e delle zone a canneto (art. 6), nonché il ripristino e la manutenzione dei canali ai fini idraulici e la realizzazione delle opere di vivificazione della Laguna (art. 5).

7.3.1 Descrizione morfologica della laguna

La morfologia lagunare è descritta dall'assetto altimetrico e batimetrico del territorio e dalla conseguente classificazione delle strutture morfologiche quali: barene, velme, bassifondi, canali, isole. L'evoluzione della morfologia della Laguna è determinata dalla risultante dei fattori che agiscono su di essa: il bilancio di sedimenti che in Laguna entrano attraverso gli apporti solidi dal bacino scolante e quelli scambiati con il mare, le variazioni di livello del mare, dovute a fenomeni di subsidenza ed eustatismo, le pressioni derivanti da azioni dovute a vento, moto ondoso, correnti di marea, ed infine le attività antropiche, come ad esempio lo scavo dei canali, la navigazione, il traffico diportistico a motore e la pesca. La tendenza evolutiva della Laguna negli ultimi decenni è stata quella di una progressiva diminuzione dell'eterogeneità morfologica, con una graduale scomparsa delle barene e delle velme, un costante approfondimento dei bassifondi, l'interrimento dei canali. Si tratta di un'inversione della naturale tendenza alla sedimentazione della Laguna veneta, in cui l'azione erosiva esercitata dal mare era insufficiente ad allontanare l'enorme quantità di sedimenti depositati dai numerosi fiumi che sfociavano all'interno del bacino. Gli interventi idraulici di arginatura, regimazione, scavo e diversione che si sono succeduti nei secoli avevano contribuito all'inversione della tendenza sedimentativa. Attualmente appaiono dominanti i processi di erosione delle strutture morfologiche lagunari tali da comportare una progressiva evoluzione da un sistema di transizione ad un ambiente con caratteristiche sempre più marine, con conseguente appiattimento e approfondimento del fondale e diminuzione della variabilità degli habitat. Tale processo è confermato dai confronti topobatimetrici dei rilievi della prima metà del secolo, degli anni '70, degli anni '90 e quelli dell'ultimo rilievo del Magistrato alle Acque che ha prodotto la carta tecnica del 2001.

La superficie delle barene è passata progressivamente da circa 115 km^2 nel 1810 ai circa 90 km^2 all'inizio del '900 agli attuali 33.5 km^2 , a causa dell'effetto della subsidenza naturale ed antropica e dell'azione erosiva dovuta al moto ondoso da vento e da natante (figura 7.5). L'effetto complessivo del processo di trasformazione in atto, non più controbilanciato dell'apporto di sedimento dal mare e dal bacino scolante, è indice della marcata tendenza evolutiva verso l'erosione, che è stata stimata in un quantitativo pari a circa un milione di metri cubi di sedimenti persi dal bacino lagunare ogni anno.

Dall'esame delle diverse carte tecniche (Carta della Laguna di Venezia – Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque 1931; Carta Tecnica Regionale 1970; Carta della Laguna di Venezia – Magistrato alle Acque 2002) si evidenzia come in tutta

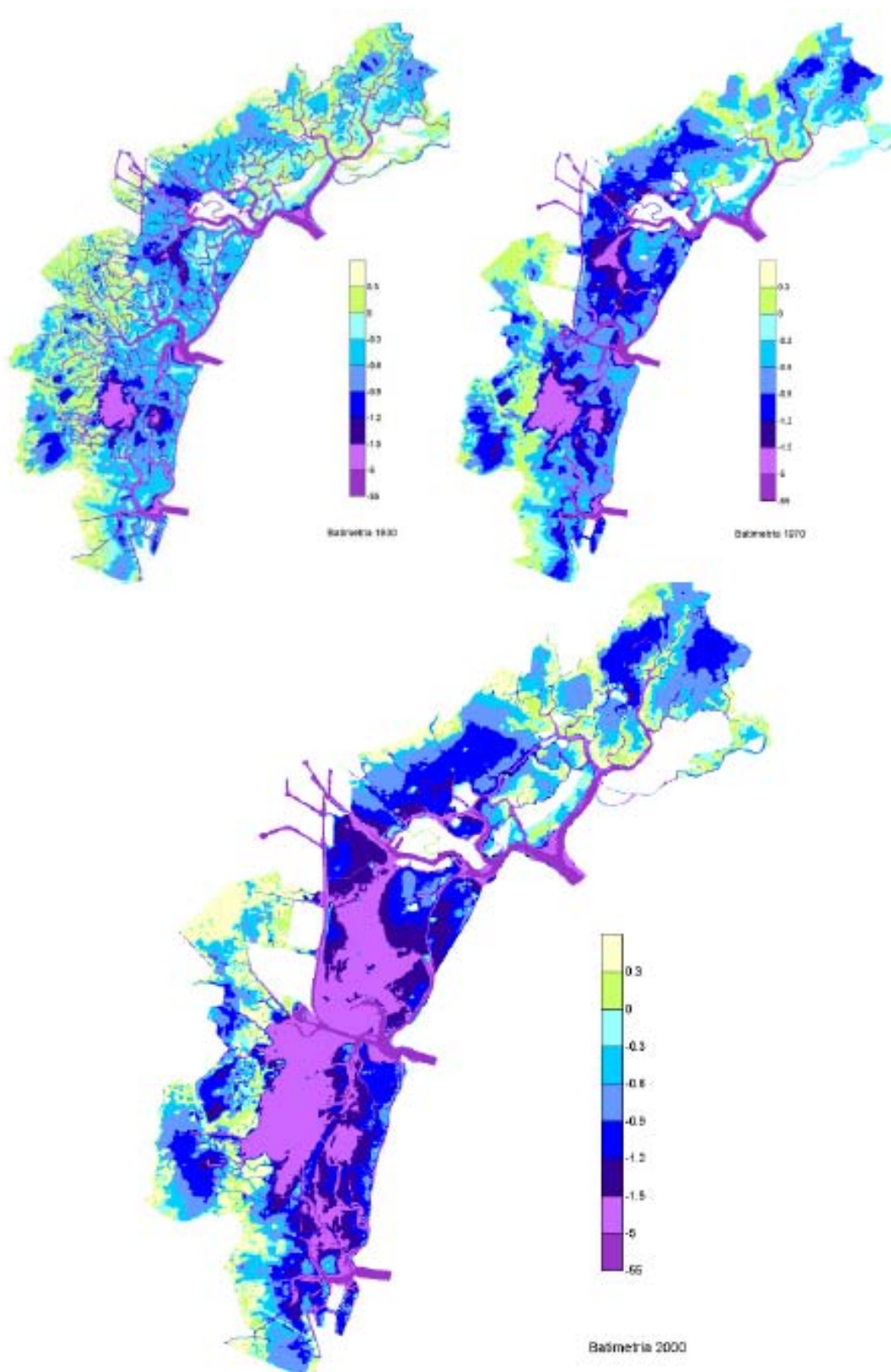


Figura 7.4: Carte batimetriche della Laguna di Venezia 1930 - 1970 - 2000, Magistrato alle Acque

l'area di progetto sono avvenuti dei considerevoli cambiamenti sul tessuto barenale. Dalla figura 7.6 risulta evidente come tutti i margini barenali abbiano subito, nel

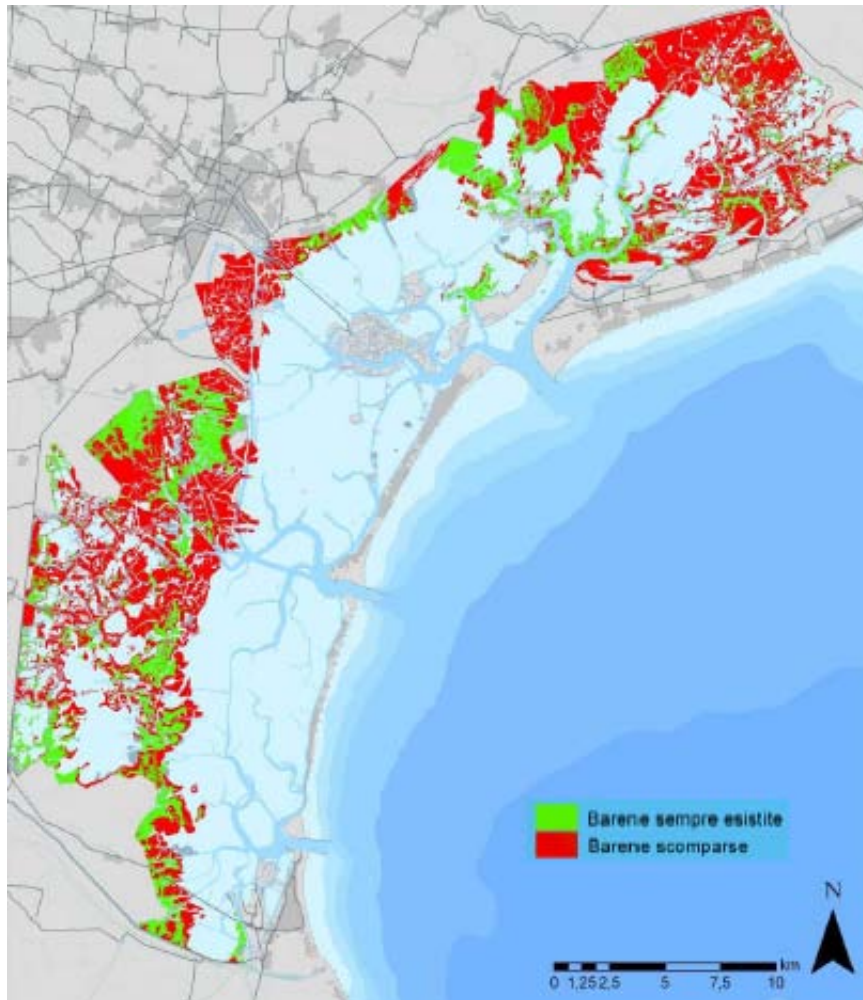


Figura 7.5: Sintesi delle superfici barenali scomparse negli ultimi due secoli

corso degli ultimi 70 anni un'importante regressione, con ratei differenti secondo l'esposizione ai fattori erosivi con un tasso medio annuo che si aggira attorno a valori pari a 0.5 m/anno e che in alcuni tratti hanno raggiunto valori annui superiori al metro.

L'altro ambiente che caratterizza ampiamente l'area di progetto è costituito dalle velme, un tempo ampiamente presenti ed ora molto ridotte in estensione. Le velme della Laguna di Venezia si mantengono, resistendo ai fattori erosivi dovuti al moto ondoso ed alle correnti di marea, solo quando sono protette dalle barene e da *dossi* o *secche*, generalmente posti a lato dei canali principali. L'erosione delle barene di bordo canale, dovuta al moto ondoso e alla carenza di apporti sedimentari dai fiumi e dal mare, provoca l'esposizione delle velme alle onde ed alle correnti mareali che assieme alla crescita relativa del livello del mare per eustatismo (11 cm) e per la subsidenza (12 cm) provoca un progressivo aumento della profondità dei fondali con formazione di maggiori onde da vento e di correnti a cui si accompagna una limitazione della crescita delle comunità stabilizzanti il fondale (fanerogame marine) per ridotta esposizione alla luce, dovuta della incrementata torbidità e profondità delle acque.

Questi fenomeni portano ad una omogeneizzazione delle quote e dei sedimenti e conducono ad una comunità biotica di fondo monotona, priva di specie vegetali di pregio e priva di specie legate a buone condizioni di stabilità dello strato superficiale.

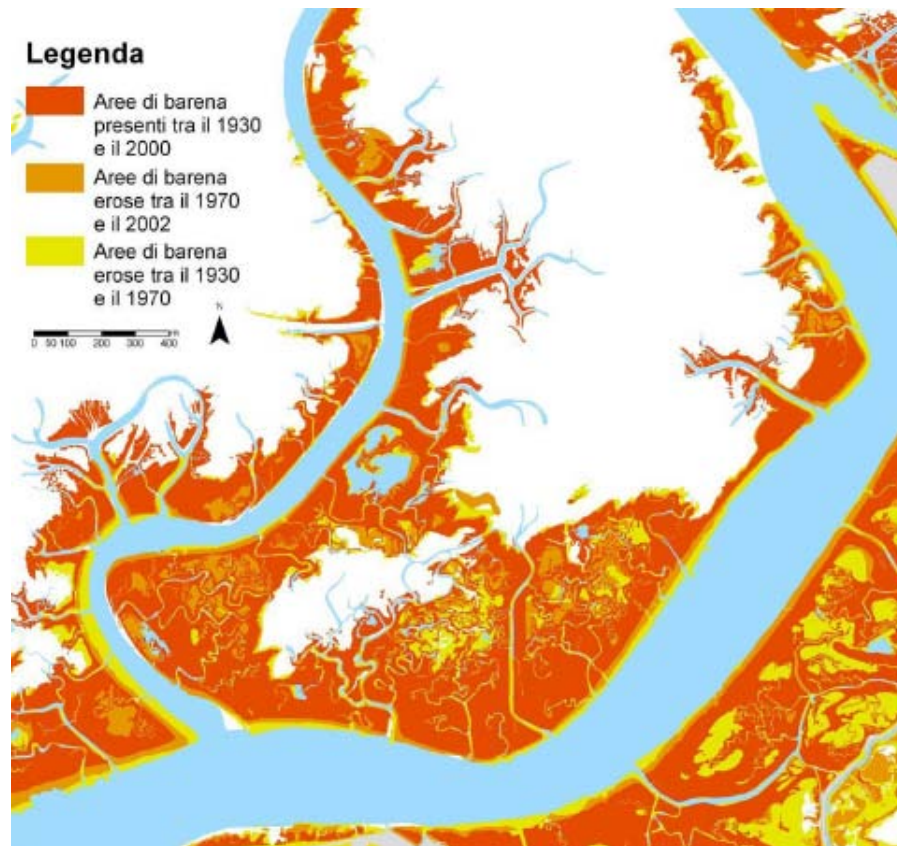


Figura 7.6: Variazione delle superfici di barena dal 1930 al 2002

Il risultato delle dinamiche erosive descritte sono evidenti dal confronto tra la ripresa aerea realizzate nel 1955 e la foto satellitare Ikonos del 2002 (figura 7.7). In particolare è chiaramente visibile come l'area di velma a S. Felice fosse particolarmente estesa negli anni '50 e si sia ridotta notevolmente nel corso degli ultimi decenni.

In tutta l'area le energie associate all'idrodinamica sono elevate, tali da compromettere la presenza e il mantenimento della velme. Per accrescersi, infatti, una velma necessita di condizioni a bassa energia, affinché la diminuzione di velocità consenta al materiale sedimentario sospeso nella colonna d'acqua di depositarsi. La scomparsa delle velme comporta, non solo la perdita di un habitat, ma anche una riduzione dell'efficacia protettiva dei bordi barenali retrostanti, che subiscono, senza un'adeguata dissipazione, tutta l'energia associata alle correnti e al moto ondoso. Il risultato è un aumento del tasso di erosione frontale della barena.

7.3.2 Caratterizzazione sedimentologica

I bassifondi della Laguna presentano caratteristiche sedimentologiche e morfologiche diverse in funzione alla loro posizione rispetto alle bocche di porto ed al regime idrologico. In generale, dalle bocche verso l'interno della Laguna si osserva una diminuzione progressiva della granulometria passando da sedimenti con alte frazioni sabbiose a sedimenti via via con maggiore frazione fine. I sedimenti depositi nelle aree più interne della Laguna sono per lo più costituiti da limi ed argille, poichè con l'approssimarsi alle aree più confinate dell'invaso lagunare, l'acqua rallenta fino a deporre la frazione più sottile dei sedimenti. La velocità della corrente è massima alle bocche di porto e diminuisce addentrandosi

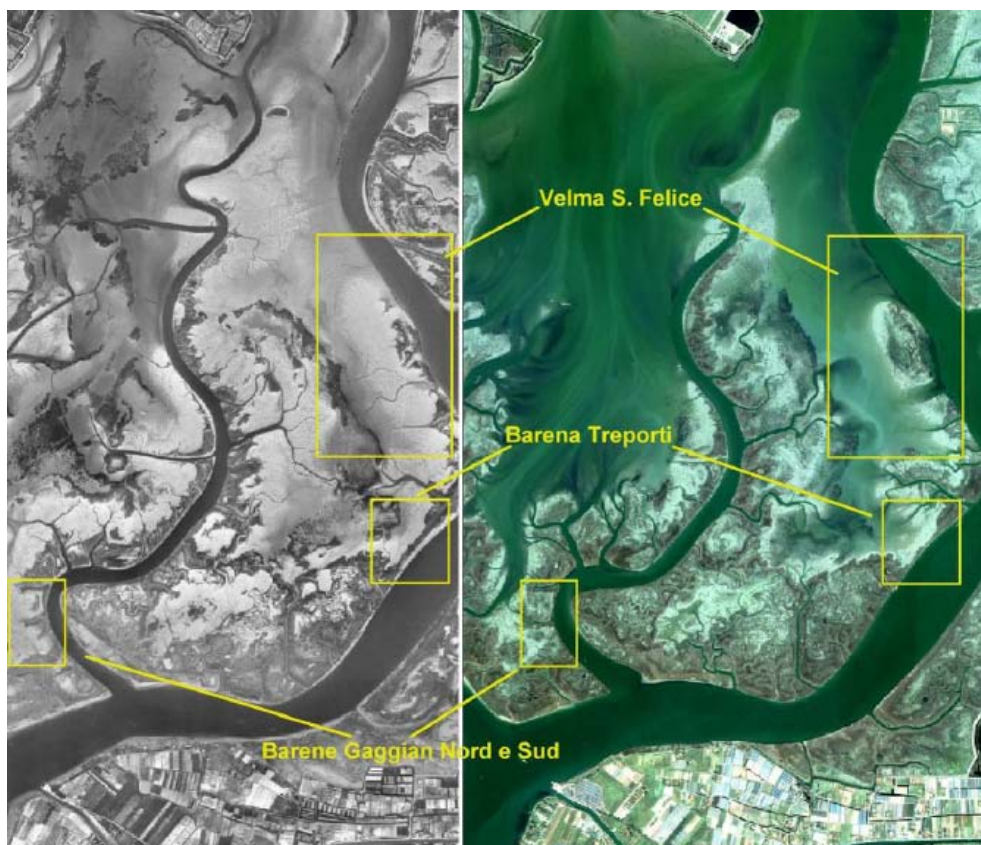


Figura 7.7: Foto aerea del 1955 e foto satellitare del 2002 a confronto

verso l'interno in corrispondenza della diminuzione della sezione dei canali, alla loro articolazione, alla variazione di profondità e morfologia del fondo, quindi le particelle più grossolane e pesanti sedimentano nelle zone più prossime alle bocche. La barena oggetto d'intervento è localizzata poco lontano dalla bocca di Lido e si tratta di un'area con presenza di sabbia, limo e argilla, dove la presenza della componente sabbiosa prevalentemente al piede delle barene e sulle velme si spiega con l'influenza che esercita la vicina bocca di porto di Lido sull'area di progetto, mentre le strutture a barena presentano caratteristiche limose/argillose.

7.3.3 Sistema idrico

I livelli, le correnti e il moto ondoso all'interno della Laguna definiscono istante per istante lo stato fisico della componente *acqua* del sistema. I livelli mareali interni alla Laguna dipendono direttamente dal comportamento del Mare Adriatico, le cui oscillazioni forzano i livelli mareali alle tre bocche di porto. In condizioni di sizigia, l'escursione della marea alle bocche è dell'ordine del metro, tra le più alte del Mediterraneo, per la conformazione stretta e allungata dell'intero bacino dell'Adriatico e per la posizione stessa della Laguna posta alla sua estremità nordoccidentale. In quadratura tale escursione risulta notevolmente ridotta, dell'ordine dei 20-30 *cm*.

In assenza di perturbazioni meteorologiche, la marea in mare e quindi alle tre bocche, coincide con quella astronomica; essa si propaga dalle bocche all'interno della Laguna secondo un equilibrio dinamico tra le forze dissipative (soprattutto quelle per attrito sul fondo), le forze d'inerzia e quelle gravitazionali.

Le correnti in Laguna di Venezia sono la manifestazione congiunta della propagazione della marea, ossia della variazione del livello dell'acqua imposto alle bocche di porto dal Mare Adriatico e del vento, se si trascurano i gradienti orizzontali di densità.

La propagazione della marea avviene principalmente lungo i canali, che si ramificano dalle bocche di porto verso i distretti più interni e rappresentano le vie preferenziali di movimento dell'acqua. Costituiscono quindi la principale forzante morfologica per la circolazione. Range indicativi che si possono assumere per le correnti di sizigia sono attorno ai 100 cm/s alle bocche; fra 20 e 50 cm/s nei canali e fra 10 e 20 cm/s nelle zone di bassofondo. Dalla carta idrodinamica ottenuta rappresentando il modello idrodinamico elaborato dal Magistrato alle Acque - Consorzio Venezia Nuova (figura 7.8), si nota come nel canale Sant'Erasmo siano presenti correnti imponenti. Sempre dall'analisi modellistica si stima che lungo questo canale la velocità possa raggiungere quasi il metro al secondo, l'elevata profondità dei canali, infatti, non permette un'efficace azione di rallentamento. Il vento, trasferendo energia alla superficie libera d'acqua, genera moto ondoso e turbolenza specialmente nelle zone di bassofondale, contribuendo a determinare la distribuzione verticale dei parametri fisici (salinità e temperatura) nella colonna d'acqua. Nelle acque lagunari la temperatura presenta valori medi attorno ai $5\text{--}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel periodo invernale e ai $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel periodo estivo.

7.4 Dragaggio della canaletta di accesso al Porto di Lido (VE)

Questo intervento di manutenzione, utile garantire la profondità navigabile alle navi in entrata e in uscita dalla bocca di Lido, si rende necessario in quanto i sedimenti del litorale, dalla lontana Bibione al più vicino Jesolo, con i venti di scirocco, vengono trasportati proprio a ridosso della bocca stessa, comportando interrimenti dell'ordine del metro e mezzo. Il rilievo fatto nel dicembre 2012 mostra come, nella canaletta di Lido, alcuni punti si sono interrati di 1.2 m , passando da 12.8 a 11.4 m . Il progetto prevede il dragaggio di 3.6 Km di canale: dopo aver fatto un rilievo della zona, la draga opera per linee parallele distanti 5 m l'una dall'altra, in un fondale non omogeneo, dove quindi lo spessore di taglio non può essere costante.

Per il dragaggio della canaletta di accesso al Porto di Lido ed il successivo refluimento nella barena di S.Felice, è stata impiegata una draga aspirante a strascico THSD, auto-caricante, auto-refluente, dotata di tramoggia di 1.400 m^3 , all'interno della quale viene riversato il materiale dragato. Il vantaggio di questo mezzo consiste nel poter dragare per strati successivi e in modo uniforme ($20 \div 30\text{ cm}$). La draga inoltre è in grado di operare senza dover ricorrere ad ancore, piloni, cavi d'ormeggio o barche di appoggio, risultando di conseguenza molto agile negli spostamenti, elemento importante a garantire il traffico marittimo in una zona piuttosto complessa come il porto di Lido. Le sue caratteristiche principali sono:

- testa di aspirazione a 4 getti;
- condotta di aspirazione di 18 m e $\varnothing 400\text{ mm}$;
- pompa dragante;
- motori delle pompe;
- condotta di refluimento;

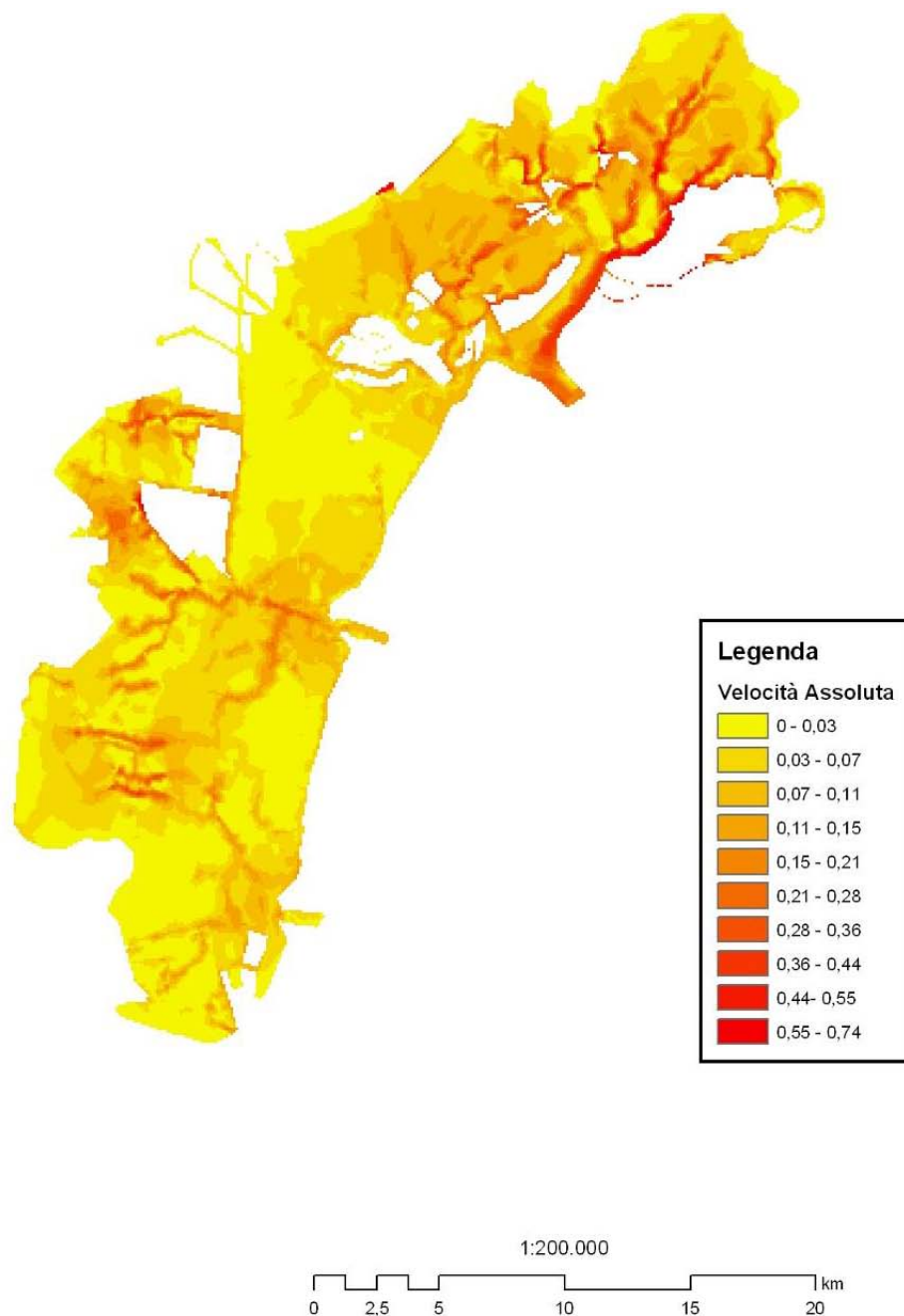


Figura 7.8: Andamento velocità di corrente con modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti

- tramoggia apribile dotata di guarnizioni a tenuta stagna;
- sistema di sfioro (overflow system);
- escavatore idraulico collegato ad un sistema di rilevamento GPS.

7.4.1 Ciclo di dragaggio

Il ciclo di dragaggio adottato è suddiviso in otto fasi fondamentali, elencate sul seguito:

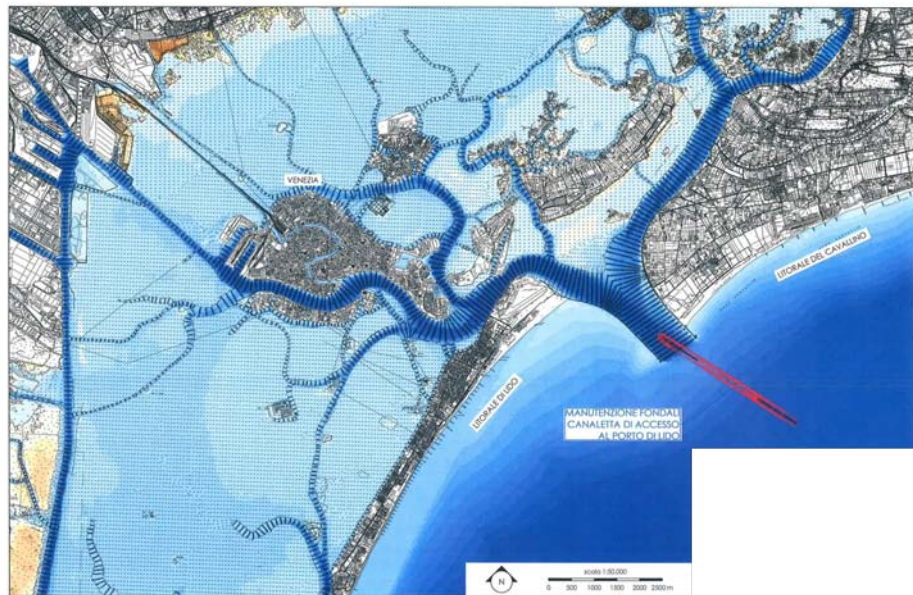


Figura 7.9: Intervento di manutenzione del fondale della canaletta di accesso al porto di Lido



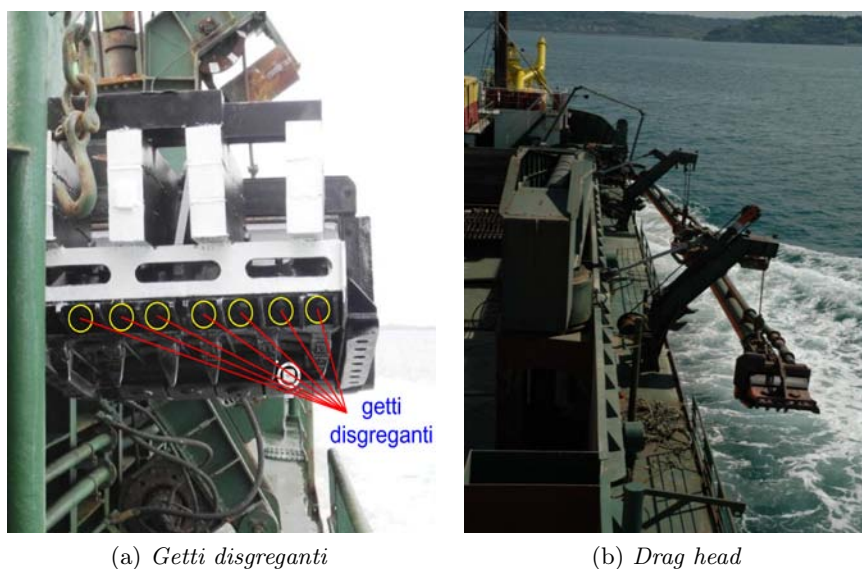
Figura 7.10: TSHD utilizzata per il dragaggio della canaletta di accesso al Porto di Lido

1. **Navigazione e posizionamento sull'area di prelievo:** con la tramoggia vuota, la nave imposta nel computer di bordo la rotta per raggiungere la canaletta di accesso al Porto di Lido e naviga fino alla posizione indicata, raggiunta la quale si posiziona nel tratto ove è presente il materiale da dragare.
2. **Abbassamento dell'elinda e posizionamento della *drag head*:** il dragaggio della sabbia nella canaletta di accesso al Porto di Lido viene effettuato navigando a bassa velocità (2/3 nodi), e prelevando il materiale durante la fase di movimento del natante, utilizzando un'elinda snodata equipaggiata all'estremità con una testa dragante (*drag head*), che viene mantenuta costantemente a contatto con il fondale. Per facilitare le operazioni di aspira-



Figura 7.11: Area di dragaggio

zione della miscela acqua-sabbia, la testa dragante attiva un sistema di getti d'acqua in grado di mettere in sospensione lo strato che dovrà esser prelevato dal fondale. La draga, con l'elinda abbassata e la drag head in funzione,



(a) Getti disagreganti

(b) Drag head

Figura 7.12: Abbassamento della condotta con drag head

percorre lentamente più volte l'area di prelievo, seguendo le rotte prestabilite mediante un sistema DGPS installato a bordo, il quale permette di definire, con precisione, la posizione della *testa* collegata alla condotta aspirante. I getti disagreganti, presenti sulla parte inferiore della testa dragante, sono regolati manualmente da un operatore mediante un pannello di comando

posto in plancia e raggiungono pressioni di $8\div 10$ bar. Facendo variare i giri del motore che alimenta i getti, si riesce a regolare l'intensità con la quale fuoriesce l'acqua dagli ugelli. In condizioni meteorologiche avverse entra in funzione un compensatore d'onda, un pistone collegato al cavo che abbassa la testa dragante e la condotta: tale sistema permette di evitare strappi sul cavo a causa di forti onde.

3. **Dragaggio del materiale dal fondo e riempimento della tramoggia:** utilizzando una pompa centrifuga, il materiale dragato sul fondo viene prima pompato sotto forma di miscela acqua-sabbia, con rapporto 5:1, attraverso una tubazione di aspirazione (velocità di 10 m/s) e successivamente riversato all'interno della tramoggia grazie ad un diffusore mobile. Tale diffusore è in grado di ruotare di 180° e di distribuire la miscela d'acqua e sabbia in diversi punti della tramoggia, agevolandone la decantazione. La parte più fine della miscela aspirata e caricata nella tramoggia durante il dragaggio viene eliminata utilizzando un sistema di overflow ad altezza regolabile con scarico al livello della nave. Al fine di aumentare la produzione giornaliera,



(a) Riempimento tramoggia con diffusore



(b) Tramoggia piena

Figura 7.13: Fasi di riempimento della tramoggia

ottimizzando dunque i tempi per le operazioni di carico, l'aspirazione mediante drag head viene interrotta quando la densità di materiale all'interno della tramoggia raggiunge un livello tale che lo sfioro superficiale non permette al materiale riversato all'interno di decantare. In questo modo si ottimizzano le fasi di carico del materiale sabbioso.

4. **Trasferimento dall'area di dragaggio a quella di refluimento:** questa fase del ciclo, in generale nei processi di dragaggio e conferimento di materiale in un'area prestabilita, influisce negativamente sul tempo effettivo di produzione e deve pertanto essere limitata il più possibile. Nel caso specifico della canaletta di Lido, il baricentro dell'area di dragaggio dista 6,5 miglia dal punto in cui si allaccia la draga alla condotta di refluimento (figura 7.11).
5. **Allacciamento alla condotta di refluimento:** il natante, giunto nell'area di scarico, si allaccia alla condotta di refluimento. La condotta è dotata di tubi $\varnothing 450\text{ mm}$, composta da un primo tratto di tubi galleggianti flessibili di circa 50 m , già assemblato e trasportato dalla draga, posizionato in acqua

e collegato a un secondo tratto composto da tubi in polietilene con manicotti galleggianti. L'assemblaggio della tubazione viene eseguito a terra o su pontone con l'ausilio di un escavatore dotato di gancio di sollevamento a norma; preliminarmente si procede con l'imbracatura del tubo, posizionamento e allineamento al successivo, fissaggio delle flange di raccordo con viti e bulloni.

6. **Refluimento:** il materiale prelevato dalla canaletta di accesso al Porto di Lido, trasportato dalla draga, viene diluito e refluito nella barena indicata dalla DL mediante ulteriori pompe di aspirazione che convogliano la miscela di acqua e sabbia dall'interno della tramoggia in condotte refluenti collegate ad uno scarico terminale. Il refluimento avviene con pompaggio della sabbia direttamente dalla draga nell'area indicata.



Figura 7.14: Fase di refluimento a scarico diretto

7. **Svuotamento della tramoggia:** Il materiale presente nella tramoggia, durante le operazioni di refluimento, viene disgregato con dei getti di acqua, perché durante le fasi di prelievo, la parte con frazione granulometrica grossa, tende a posizionarsi sul fondo della stiva. Questo materiale molto compatto per esser aspirato deve essere convertito in miscela utilizzando dei water jet, posizionati sia a prua sia a poppa della tramoggia; tali getti, attivati manualmente da un operatore, che ne regola l'intensità e la direzione grazie ad un quadro di comando posto in plancia, sono in grado di disgregare il materiale presente in tutti i punti del pozzo di carico.
8. **Ritorno al sito di dragaggio:** refluito tutto il materiale presente nella tramoggia, si scollega la tubatura di refluimento e la draga ritorna all'area di prelievo dove ricomincia il ciclo di dragaggio. Nella tabella 7.2 viene riportato il ciclo produttivo della draga per l'intervento in esame.

Per l'intervento alla canaletta di accesso al porto di Lido è stato utilizzato un *dragaggio efficiente*, ossia un insieme di operazioni e strumenti che consentono alla ditta esecutrice di ottenere il massimo beneficio economico ed ambientale al minimo costo: l'utilizzo ottimale delle apparecchiature di bordo, la riduzione del tempo di dragaggio, la semplificazione della diagnosi dei guasti, le attrezzature per ridurre i tempi di inattività e la prevenzione del sotto/sovra dragaggio, sono tutti benefici operativi del dragaggio efficiente.



Figura 7.15: Disgregazione e diluizione del materiale in tramoggia

Tipologia di operazione	Durata temporale
Inizio carico - fine carico	~ 150 min
Trasferimento	~ 60 min
Aggancio con condotta	~ 15 min
Refluento e distacco	~ 135 min
Ritorno al sito di dragaggio	~ 60 min
	~ 420 min (7 ore)

Tabella 7.2: Ciclo produttivo della draga

Il concetto di dragaggio efficiente, che comporta un incremento di produzione dal 15 al 25 %, per una draga TSHD, ottimizza:

- il processo di aspirazione durante il trascinamento;
- il processo di assestamento nella tramoggia;
- l' accuratezza nella posizione;
- il tempo di ciclo in relazione al tempo di navigazione;
- il processo di pompaggio durante il refluento;
- l' utilizzo e la distribuzione della potenza disponibile;
- la formazione dell'equipaggio.

7.5 Ripristino barena di San Felice

Per quanto riguarda il ripristino della funzionalità morfologica ed ambientale del sistema di velme e barene, lungo la sponda del canale di S. Felice, si sono principalmente impiegate tecniche di refluento di sedimenti, per mantenere le adeguate forme intertidali riportando alla quota di barena aree depresse ed in disgregazione con l'apporto di sedimenti a diversa granulometria e per fasce batimetriche successive, favorendo la ripresa della colonizzazione da parte della

vegetazione alofila. L'impiego poi delle strutture modulari, quali fascinate e burghe, si necessita per impedire la dispersione del materiale refluito, e per limitare l'erosione in brevi tratti di margine particolarmente sollecitati.



Figura 7.16: Barena di San Felice

Confrontando la cartografia del 1934 e le riprese aeree dei decenni successivi si evidenzia che l'arretramento subito dai margini di queste barene è avvenuto sostanzialmente sul lato prospiciente il Canale S. Felice; esso è da imputarsi principalmente alle forti correnti mareali, provenienti sia dal canale Rigà che dallo stesso S. Felice, ed in misura minore al moto ondoso da natante, responsabile degli arretramenti recenti particolarmente intensi nel periodo estivo. Più vistosa e più importante è stata la scomparsa delle velme, passate da una superficie di 12.5 *ha* nel 1934 ad una superficie attuale di circa 6 *ha*.

L'obiettivo degli interventi per quest'area è quindi la conservazione ed il ripristino di adeguate superfici delle velme mediante l'applicazione di una serie di tecniche sperimentali a basso impatto ambientale in grado di contrastare i fenomeni erosivi in atto e di favorire i processi sedimentari naturali recuperando quei gradienti morfologici caratteristici della successione barena-velma-bassofondale. In particolare, i risultati che si vogliono ottenere con gli interventi proposti riguardano:

- la protezione ed il consolidamento del margine delle barene lato canale S. Felice mediante la realizzazione di una difesa elastica a *spiaggia* che garantisca lo smorzamento delle correnti e delle onde;
- il ripristino della quota batimentrica delle velme, attraverso l'apporto di sedimenti a matrice sabbioso – limosa in sostituzione dei processi sedimentari naturali, ormai inesistenti;
- il recupero ed il ripristino dell'habitat di velma.

7.5.1 Fasi del refluimento in barena San Felice

I° fase: realizzazione di un argine perimetrale lungo l'area autorizzata nella Barena San Felice, mediante escavatore posizionato sopra un pontoncino d'appoggio.



Figura 7.17: Arginello perimetrale

II° fase: posa dello sfioratore, stesa della condotta di refluimento e posizionamento del pontoncino d'appoggio con condotta di mandata nella prima parte dell'area di refluimento. Allacciamento alla draga ed inizio fase di refluimento.



Figura 7.18: Inizio fase di refluimento

III° fase: refluimento in barena e spostamento verso sud del pontoncino con condotta

di mandata.

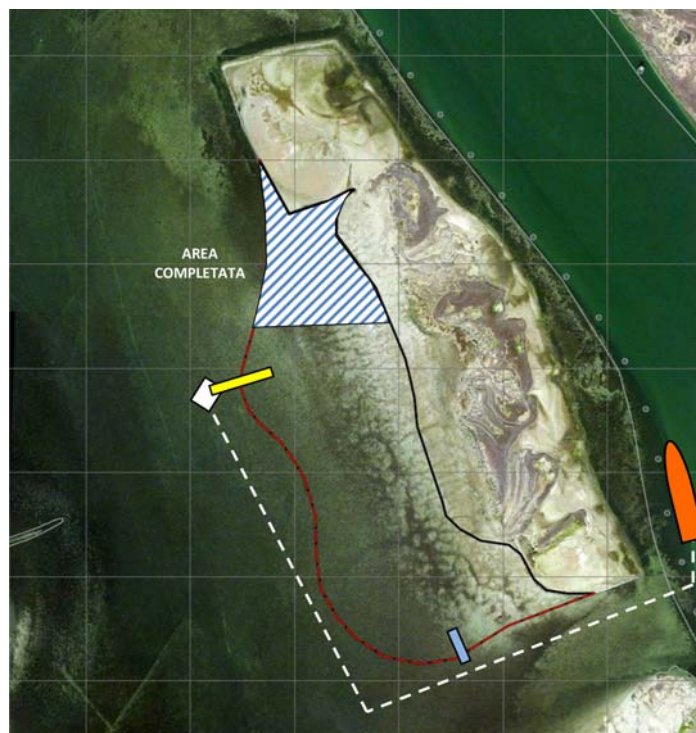


Figura 7.19: Fasi di refluimento intermedie

IV° fase: refluimento nella parte terminale della barena e recupero delle condotte precedentemente utilizzate.

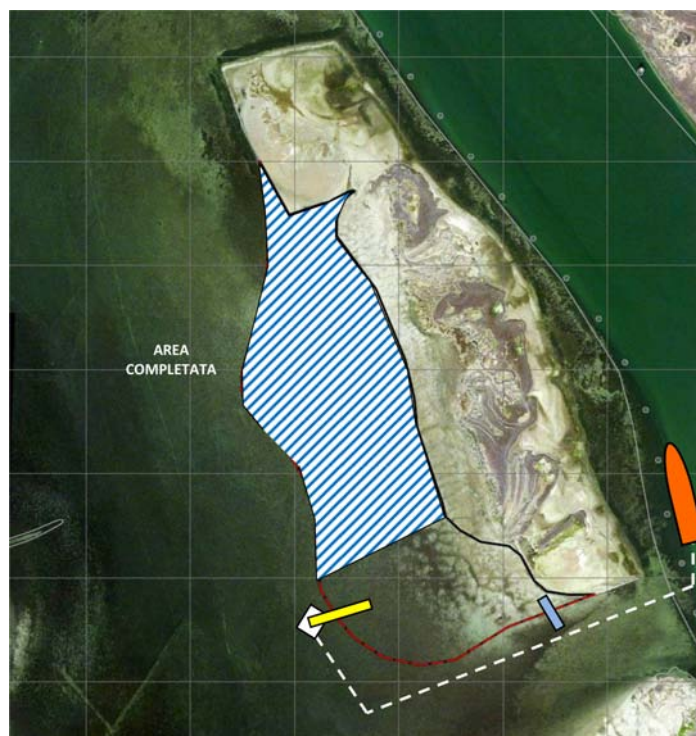


Figura 7.20: Fase finale del refluimento

Capitolo 8

Analisi dei costi

8.1 Stima dei tassi di produzione operativi

Molti fattori influenzano i tassi di produzione operativi, ossia la produzione media durante il tempo effettivo di lavoro, nell'ambito di un dragaggio idraulico: la dimensione della draga, il progetto del dragaggio, la potenza della pompa, la profondità, la lunghezza delle condotte, l'elevazione del punto di scarico, la distribuzione granulometrica, la densità del sedimento, lo spessore del taglio, l'esperienza dell'operatore ed altri fattori minori. Pertanto, la produzione è legata alla capacità intrinseca dell'equipaggiamento, al sito, alle condizioni operative, e alle proprietà del materiale dragato. La produzione complessiva sostenuta è legata al tasso di produzione, all'efficienza effettiva nell'orario di lavoro, e alla stagione in cui si opera. I tassi complessivi di produzione variano notevolmente a seconda dei progetti e dei tipi di draga.

La produzione per le draghe meccaniche è funzione della dimensione della benna, dell'effettivo riempimento del secchio, del tempo di ciclo effettivo per il carico del secchio, delle dimensioni della chiatta, dello spessore del taglio e dell'effettiva efficienza nell'orario di lavoro. Per progetti ambientali le benne variano in genere tra i 2 e gli 8 m^3 . Il tempo di ciclo viene generalmente definito come il tempo complessivo necessario per completare il processo di chiusura della benna per scavare un secchio carico di sedimenti, sollevarlo attraverso la colonna d'acqua e scaricarlo infine nella chiatta, fino ad abbassare la benna al fondo riposizionandola per una nuova operazione. Per i progetti di navigazione, i tempi di ciclo sono di un minuto circa, tuttavia possono essere più lunghi (2-8 minuti) per progetti di bonifica, perché questi necessitano di maggior attenzione per posizionare con precisione la benna, e per limitare la risospensione riducendo la velocità della stessa.

8.1.1 Metodi per stimare il tasso di produzione operativo

Il tasso di produzione può essere valutato con vari strumenti, dagli algoritmi di livello concettuale basati sulle caratteristiche di funzionamento ai sofisticati programmi per computer; essi variano quindi da semplici calcoli analitici basati su parametri operativi che sfruttano le informazioni sui tassi di produzione disponibili (pubblicati) a modelli più sofisticati che tengono conto di tutti i parametri come la lunghezza delle condotte, il bisogno di pompe ausiliarie, etc. Questi metodi sono abitualmente utilizzati nei progetti di dragaggio di navigazione ma possono essere usati anche in progetti di dragaggio ambientale dopo aver considerato l'effetto del

trattamento, del monitoraggio, della risospensione e delle misure di controllo delle perdite.

8.1.2 Tassi di produzione per dragaggio meccanico sulla base di parametri operativi

I tassi di produzione massimo e medio per draghe meccaniche possono essere stimati utilizzando i parametri di funzionamento della benna, il tempo di ciclo, e la percentuale di riempimento della benna con le relazioni 8.1 e 8.2:

$$P_m = V_b \cdot \frac{60}{t_c} \cdot \frac{f}{100} \quad (8.1)$$

dove:

$$\begin{cases} P_m = \text{tasso di produzione massimo (m}^3/\text{h)} \\ V_b = \text{dimensione della benna (m}^3\text{)} \\ f = \text{riempimento della benna (\%)} \\ t_c = \text{tempo di ciclo (min)} \\ 60 = \text{fattore di conversione (min/h)} \end{cases}$$

e

$$P_o = P_m \cdot EWTE \quad (8.2)$$

dove:

$$\begin{cases} P_o = \text{tasso di produzione medio (m}^3/\text{h)} \\ EWTE = \text{rendimento orario di lavoro} \end{cases}$$

La dimensione della benna o il suo volume è specifico per ogni produttore, anche se, per dragaggio ambientale, varia solitamente tra i 2 e gli 8 m³.

Il riempimento percentuale della benna è in gran parte funzione della sovrapposizione dei tagli della benna stessa. Benne per dragaggi ambientali sono progettate per un riempimento del 100 % per una profondità di taglio impostata, tuttavia, a causa della natura variabile dei depositi di sedimenti contaminati, nonché della rimozione di strati di sedimenti contaminati relativamente sottili, non tutti i tipi di benna mordente si trovano allo spessore di riempimento ottimale. Vi è anche rischio di un'eccessiva penetrazione quando, nel tentativo di raggiungere un fattore di riempimento massimo, si può incorrere in un aumento dei residui e in un effetto negativo sulla qualità delle acque. In via generale, con un preciso posizionamento, maggiore è la dimensione della benna, minore è la percentuale di sovrapposizione.

Il tempo di ciclo può variare in modo significativo, come visto in precedenza: un tempo di ciclo dai 2 ai 4 minuti può essere utilizzato per stime di produzione per una profondità di 6 m o inferiori e senza fasi di risciacquo della benna durante il ciclo. Un tempo più lungo è adatto per profondità maggiori.

8.1.3 Tassi di produzione per dragaggio idraulico sulla base di parametri operativi

Per il dragaggio idraulico, il tasso di produzione massimo può essere stimato utilizzando parametri di funzionamento come la grandezza della pompa, la velocità di scarico della pompa, ed il rapporto tra la concentrazione di sedimenti fluidi nella condotta e la concentrazione di sedimenti solidi in sito (entrambi in peso) come segue:

$$P_m = 0.926 \left[3.14 \left(\frac{d^2}{4} \right) \right] (v) \left(\frac{S_{sl}}{S_{sed}} \right) \quad (8.3)$$

dove:

$$\begin{cases} P_m = \text{tasso di produzione massimo (m}^3/\text{h)} \\ d = \text{diametro del tubo (cm)} \\ v = \text{velocità di scarico (\%)} \\ \frac{S_{sl}}{S_{sed}} = \text{rapporto liquido/solido nella miscela} \\ 0.926 = \text{fattore di conversione per (sec/h)} \end{cases}$$

e

$$P_o = P_m \cdot EWTE \quad (8.4)$$

dove:

$$\begin{cases} P_o = \text{tasso di produzione medio (m}^3/\text{h)} \\ EWTE = \text{rendimento orario di lavoro} \end{cases}$$

La dimensione draga è solitamente definita in funzione del diametro della condotta di scarico. La velocità di scarico della condotta varia con una serie di fattori, quali: la potenza della pompa, la lunghezza delle condotte, la differenza di pressione statica tra la superficie d'acqua nel sito di dragaggio e il punto di scarico, l'aggiunta di pompe ausiliarie, etc.

Volendo ad esempio calcolare il tasso di produzione P_m per la draga TSHD utilizzata nei due casi di studio esaminati, risulta:

$$\begin{cases} d = 40 \text{ cm} \\ v = 10 \text{ m/s} \\ \frac{S_{sl}}{S_{sed}} = 5 \end{cases}$$

e quindi:

$$P_m = 0.926 \left[3.14 \left(\frac{40^2}{4} \right) \right] (0.1) \cdot 5 = 580 \text{ m}^3/\text{h}$$

Essendo il tempo di carico pari a 150 minuti, il volume della tramoggia risulta:

$$V = 580 \cdot 2.5 = 1450 \text{ m}^3$$

8.2 Stima del tasso di produzione sostenuto

Il volume totale da dragare per ogni draga, il tasso di produzione operativo delle draghe, il tempo di produzione di ogni draga, ed il tasso di produzione sostenuto¹, determinano la durata totale per eseguire il progetto: ciò risulta vantaggioso per pianificarlo in modo che l'esecuzione venga completata in tempi ragionevoli. Il metodo più diretto per calcolare la durata richiesta di un progetto è quello di determinare in primo luogo il tasso di produzione sostenuto e calcolare direttamente il numero di cicli di dragaggio per completare il progetto. Il tasso di produzione sostenuto considera le ore di produzione giornaliere, i giorni di lavoro a settimana, e le settimane di produzione in un anno; esso può essere calcolato come segue:

¹è basato sul volume di sedimenti rimosso durante l'intera stagione di dragaggio, espresso in metri cubi al giorno, o a settimana; rappresenta un tasso di produzione complessivo

$$P_s = P_m \cdot EWTE \cdot SE \quad (8.5)$$

dove:

$$\begin{cases} P_s = \text{tasso di produzione sostenuto (m}^3/\text{h)} \\ P_m = \text{tasso di produzione massimo (m}^3/\text{h)} \\ EWTE = \text{rendimento orario di lavoro} \\ SE = \text{efficienza stagionale} \end{cases}$$

Considerazioni nel determinare l'efficienza effettiva di lavoro (EWTE), includono il tempo previsto per:

- manutenzione di routine quotidiana (per la draga, i sistemi di dewatering, etc.);
- movimento delle attrezzature (chiatte, condotte, o movimenti della draga);
- indagini e monitoraggio;
- rifornimento;
- calibrazione e manutenzione dei sistemi di navigazione di precisione;
- tempo di standby per le ispezioni delle agenzie, la gestione della qualità delle acque, l'attesa per i risultati dei test;
- meteo;
- traffico marittimo nella zona.

8.3 Durata del progetto e numero di draghe

Stimati i tassi di produzione sostenuta, può essere calcolato il tempo previsto per completare il progetto (durata del progetto) ed il numero di draghe necessario a realizzarlo. La durata totale può essere calcolata con la 8.6:

$$T_{progetto} = \frac{V_{dp}}{P_s} \quad (8.6)$$

dove:

$$\begin{cases} T_{progetto} = \text{durata del progetto} \\ V_{dp} = \text{volume del prisma dragaggio (m}^3\text{)} \\ P_s = \text{tasso di produzione sostenuta (m}^3/\text{stagione di dragaggio)} \end{cases}$$

La durata del progetto sottoforma di stagioni di dragaggio può essere calcolata per un determinato numero di draghe utilizzando un tasso di produzione sostenuto equivalente, per una data flotta. La durata prevista può quindi essere paragonata a specifici standard di prestazione per la durata massima consentita del progetto. Per i progetti di dimensioni moderate, la dimensione della draga può essere selezionata per consentire il completamento di tutto il progetto di dragaggio in una sola stagione. Questo confronto può essere fatto per tentativi fino a quando non si ottiene la migliore combinazione tra il numero e le dimensioni delle draghe.

8.4 Costi standard

Il dragaggio è un settore ad alta intensità di capitale, che coinvolge spesso solo parte dell'equipaggiamento relativo alle costruzioni marittime in ogni progetto. È anche un'attività di ingegneria civile idraulica che avviene spesso in un ambiente inospitale, dove i costi di indagine possono essere elevati e i rischi di costruzione sono notevoli a causa delle condizioni di lavoro e delle difficoltà nell'ottenere informazioni sul sito. Di conseguenza, i lavori di dragaggio tendono ad essere soggetti a variazioni, a nuove misure e a controversie relative alla valutazione. La stima dei costi di capitale e di equipaggiamento è cruciale per la valutazione di tali questioni.

Nel seguito sono presentati gli standard di costo e i metodi standardizzati per la valutazione dei costi delle varie componenti come, ad esempio, gli ammortamenti e gli interessi, i costi di manutenzione e di riparazione.

Il costo di esercizio delle attrezzature è soltanto una componente del costo totale di un sito di dragaggio e le strutture di costo, per le politiche di ammortamento, variano tra le diverse società e sono spesso specifiche per ogni progetto.

8.4.1 Principi base dei costi standard

I valori standard (V), le tariffe standard per l'ammortamento e gli interessi (D+i) e le tariffe standard per la manutenzione e la riparazione (M+R) derivano da dati tecnici, economici e statistici; in particolare (D+i) non includono costi come:

- carico, scarico e trasporto;
- montaggio e smontaggio;
- equipaggio;
- assicurazione;
- impianti ausiliari;
- carburante e lubrificanti;
- usura del materiale;
- supervisione a bordo.

Le tariffe standard non coprono i costi di un servizio di gestione dell'impianto, che comprendono:

- supervisione e stoccaggio;
- supporto tecnico;
- assicurazione;
- disposizioni speciali;
- modifiche necessarie per un particolare progetto.

Valore standard V (€): qualunque sia il numero di anni effettivo dell'impianto utilizzato, il valore standard deve essere messo in relazione con il valore corrente di sostituzione del bene: questo è necessario per stimare l'aumento dei costi dei pezzi di ricambio nel bilancio di manutenzione, e per dare alla società esecutrice la possibilità di sostituire gli impianti al termine della loro vita utile. Il valore standard V è considerato il valore di sostituzione, cioè il nuovo prezzo di acquisto al netto dell'IVA dei mezzi di produzione.

Indicizzazione: gli indici per i valori standard, vengono calcolati per ogni sezione in base ai dati di indice ufficiali dell'Eurostat o altri dati pubblicati, i quali vengono ponderati per corrispondere ai dati ottenuti dall'industria di dragaggio.

Durata N (anni): per durata si intende il periodo tra l'ordine di un pezzo di equipaggiamento e il momento in cui questo risulta inefficiente per continuare a mantenere le attrezzature in uso.

Periodi di utilizzo (settimane/anno): in un dato momento, l'attrezzatura può essere:

- a in uso per un progetto;
- b messa fuori produzione per revisione o riparazione;
- c in attesa di assegnazione di attività.

Il periodo in cui l'apparecchiatura è nella fase (a) è definito il periodo di utilizzo; esso può variare per le varie attrezzature e nell'arco della loro vita utile.

Ammortamento ed interessi D+i (% di V): quando si determina lo standard per l'ammortamento (D) e gli interessi (i) per la maggior parte delle voci di un impianto, deve essere preso in considerazione un valore residuo. L'ammortamento è determinato tramite il metodo di rendita, adatto per i costi elevati di investimento alla luce della lunga vita di servizio delle apparecchiature di dragaggio, mentre il tasso di interesse i, è preso pari al 7 % di un'annualità.

Manutenzione e costi di riparazione M+R (% di V): la manutenzione (M) e la riparazione (R) sono definite come quelle attività che vengono svolte con l'obiettivo di mantenere un sistema in uno stato di efficienza necessario al sistema per eseguire correttamente le proprie funzioni.

Costi fissi e costi variabili: dei costi di manutenzione e riparazione, il 40 per cento sono considerati fissi e il 60 per cento variano con il numero di ore di servizio dell'impianto. $M + R$ deve essere moltiplicato per il fattore F, determinato con l'equazione 8.7, quando si assumono ore di servizio diverse da quelle riportate nelle tabelle.

$$F = 1 + 0.6 \cdot (A - H)/H \quad (8.7)$$

dove:

$$\begin{cases} F = \text{fattore moltiplicativo} \\ A = \text{numero di ore di servizio attuali} \\ H = \text{ore di servizio tabellate} \end{cases}$$

Indagini interne ed esterne: l'usura dell'attrezzatura da parte del materiale trasportato non è inclusa nei costi di M+R: la natura del terreno da trasportare ha un effetto significativo sulla vita utile delle parti meccaniche a contatto. Il calcolo dei costi dovrebbe essere basato allora su un valore determinato mediante un'indagine che valuti lo stato tecnico delle attrezzature all'inizio e alla fine del progetto.

8.4.2 Tabelle dei costi standard

Draga aspirante semovente

Service life	18 years
Service hours	168 hours per week
Residual value	10 % of V
Utilisation period	33 weeks
D+i	9.647 % of V per year or 0.292 % per week
Standard value:	

$$V = 6\,000 \cdot W + 1\,212\,000 \cdot W^{0.35} - 6\,464\,000 + 1\,900 \cdot P_t + 785 \cdot J_t + 910 \cdot S \quad (8.8)$$

Draga aspirante con disgregatore

Service life	18 years
Service hours	168 hours per week
Residual value	10 % of V
Utilisation period	26 weeks
D+i	9.647 % of V per year or 0.371 % per week
Standard value:	

$$V = 2\,000 \cdot C + 80\,000 \cdot W_{cgb} + 1\,400 \cdot (P + J) + 8\,500 \cdot W + 141\,000 \cdot W^{0.35} + 950 \cdot S \quad (8.9)$$

Draga a cucchiaio

Service life pontoon	20 years
Service life cable crane	10 years
Service hours	84 hours per week
Residual value pontoon	5 % of V
Residual value crane	5 % of V
Utilisation period	26 weeks
D+i pontoon	9.317 % of V per year or 0.358 % per week
D+i crane	13.876 % of V per year or 0.534 % per week
M+R pontoon	5.20 % of V per year or 0.20 % per week
M+R crane	9.880 % of V per year or 0.380 % per week
Standard value	$V = 4\,000 \cdot W_{pontoon} + 1\,000 \cdot W_{crane} + 2\,370 \cdot I$

Hopper volume ^a	Displacement at dredging mark ^b	Lightweight (W)	Power dredge pumps during suction ^c (P_t)	Power jet pumps on draghead (J_t)	Free sailing propulsion power (S)	Value ^d (V)	Costs per week (D+i)	Costs per week (M+R)	M+R/ week
m ³	t	t	kW	kW	kW	€	€	€	% of V
900	2 000	635	350	220	950	10 600 000	30 952	21 917	0.2068
1 300	3 000	945	600	300	1 550	15 300 000	44 676	30 508	0.1994
1 800	4 000	1 260	880	360	2 200	19 800 000	57 816	38 734	0.1956
2 400	5 200	1 640	1 000	660	2 500	24 200 000	70 664	42 625	0.1761
2 700	5 800	1 800	1 250	660	3 550	27 200 000	79 424	45 142	0.1660
3 500	7 600	2 400	1 550	760	4 000	33 600 000	98 112	50 513	0.1503
4 700	9 900	3 050	1 950	800	5 100	40 900 000	119 428	56 639	0.1385
6 200	13 000	3 925	2 400	850	6 450	50 100 000	146 292	64 359	0.1285
7 700	16 000	4 780	2 600	1 000	7 350	58 100 000	169 652	71 072	0.1223
9 100	19 000	5 635	3 500	1 600	9 400	68 700 000	200 604	79 967	0.1164
11 000	23 000	6 830	4 320	1 600	10 800	80 400 000	234 768	89 786	0.1117
12 500	26 000	7 610	5 200	1 600	13 000	89 800 000	262 216	97 674	0.1088
13 500	29 000	8 685	5 200	1 800	13 000	97 700 000	285 284	104 303	0.1068
18 000	40 000	12 100	6 680	2 000	16 700	128 000 000	373 760	129 730	0.1014
19 000	42 000	13 750	7 000	2 000	17 500	141 000 000	411 720	140 639	0.0997
22 500	48 000	15 950	7 200	3 000	18 000	157 000 000	458 440	154 066	0.0981
24 000	60 000	18 250	9 600	4 000	24 000	184 000 000	537 280	176 723	0.0960
35 000	83 000	22 440	9 600	4 000	24 000	212 000 000	619 040	200 220	0.0944
45 000	105 000	27 000	13 000	4 500	38 000	261 000 000	762 120	241 339	0.0925

Tabella 8.1: Costi standard per draga aspirante semovente

^aPer draghe aspiranti semoventi prive di certificato per zona di navigazione illimitata, V dovrebbe essere aumentato del 10 %^bdefinito come W+portata lorda, con portata lorda pari alla differenza tra il dislocamento pesante o di pieno carico estivo convenzionale ed il dislocamento a vuoto^ca meno che le pompe della draga durante la navigazione, non abbiano una potenza ausiliaria da utilizzare per altre applicazioni, P_t è definita come il 40 % della potenza del motore^di valori standard per draghe molto grandi sono diversi rispetto a quelle più piccole in quanto caricano attrezzature extra come pompe sommerse e condotte estese

Power cutter motors ^a (W)	Weight of cutter gearbox (W _{cgb}) t	Power dredge and jet pumps (P+J) kW	Lightweight (W) t	Propulsion power (S) kW	Remarks	Value (V) €	Costs per week (D+i) €	M+R/ week (M+R) €	% of V
1 750	50	8 000	4 300	1 750		59 500 000	220 745	79 351	0.1334
2 000	55	8 500	4 700	2 000		64 900 000	240 779	84 198	0.1297
2 500	75	8 000	5 100	3 500		71 700 000	266 007	90 302	0.1259
3 000	80	7 000	6 250	3 000		81 200 000	301 252	98 830	0.1217
4 000	105	9 600	6 050	7 400	FSC ^b	93 100 000	345 401	109 512	0.1176
6 000	145	16 000	10 650	7 400	FSC	150 000 000	556 500	160 588	0.1071
6 000	450	15 000	11 000	7 000	DE ^c	158 000 000	589 890	168 667	0.1068
7 600	220	16 000	13 700	7 600	DE	201 880	0.1041		

Tabella 8.2: Costi standard per draga aspirante con disgregatore

^aPer draghe aspiranti con disgregatore prive di certificato per zona di navigazione illimitata, V dovrebbe essere aumentato del 10 %
^bnel caso in cui la draga sia equipaggiata con una perforatrice flessibile, occorre aggiungere il 2 % al valore ottenuto dalla 8.9
^cnel caso in cui la draga sia diesel-elettrica, occorre aggiungere il 6 % al valore ottenuto dalla 8.9

Lightweight pontoon ($W_{pontoon}$)	Weight of crane (W_{crane})	Installed power crane (I)	Value (V)	Costs per week (D+i) (M+R)	
t	t	kV	€	€	€
250	70	147	1 418 000	5 812	3 588
250	90	212	1 592 000	6 741	4 250
500	120	212	2 622 000	10 481	6 364
500	150	212	2 652 000	10 642	6 478
750	200	650	4 741 000	20 037	12 616

Tabella 8.3: Costi standard per draga a cucchiaio

Volume	Lightweight (W)	Propulsion power ($P + S_b$)	Value (V)	Costs per week (D+i) (M+R)		M+R/ week
m ³	t	kV	€	€	€	% of V
1 650	1 150	1 900	13 300 000	56 658	23 940	0.180
2 000	1 490	1 800	15 500 000	66 030	26 350	0.170
3 400	2 000	3 100	19 900 000	84 774	27 860	0.140
3 700	2 470	4 250	23 600 000	100 536	28 320	0.120

Tabella 8.4: Costi standard per chiatta semovente

Chiatta semovente

Service life	18 years
Service hours	168 hours per week
Residual value	5 % of V
Utilisation period	23 weeks
D+i	9.794 % of V per year or 0.426 % per week
Standard value	$V = 2\,460 \cdot W + 762\,600 \cdot W^{0.41} - 4\,920\,000 + 860 \cdot (S + S_b)$

Rimorchiatore

Service life	18 years
Service hours	84 hours per week
Residual value	5 % of V
Utilisation period	26 weeks
D+i	9.794 % of V per year or 0.377 % per week
M+R	9.10 % of V per year or 0.350 % per week
Standard value	$V = 1\,450 \cdot S$

Condotta a terra

Residual value	in and out survey
Utilisation period	26 weeks
i	7.0 % of V per year or 0.269 % per week
M+R	related to type and quantity of the soil
Standard value	according to table of examples

Propulsion power (S)	Lenght	Value (V)	Costs per week (D+i) (M+R)		M+R/ week
kV	m	€	€	€	% of V
1x283	15.0	410 350	1 547	1 436	0.350
2x104	15.0	301 600	1 137	1 056	0.350
2x140	14.5	406 000	1 531	1 421	0.350
2x164	16.0	475 600	1 793	1 665	0.350
2x180	15.5	522 000	1 968	1 827	0.350
2x223	16.0	646 700	2 438	2 263	0.350

Tabella 8.5: Costi standard per rimorchiatore

Nominal diameter (mm)	New wall thickness (mm)	Rejection thickness (mm)	Value €	i per week €
300	6	2	1 350	3.60
400	8	3	1 660	4.50
500	10	4	2 490	6.70
600	12	4	3 320	8.90
700	16	5	4 670	12.60
800	16	5	5 175	13.90
900	18	6	6 000	16.10
900	20	6	7 040	18.90
1 000	20	6	7 600	20.40
1 000	25	6	9 100	24.50
1 100	20	6	8 375	22.50
1 100	25	6	10 000	26.90

Tabella 8.6: Costi standard per condotte a terra (lunghezza standard = 12 m)

Nominal diameter (mm)	New wall thickness (mm)	Working pressure (bar)	Value €	i per week €
300	10	10	3 945	10.60
400	14	10	4 240	11.40
500	18	10	5 825	15.70
600	18	10	7 400	19.90
700	20	10	8 680	23.30
800	25	10	11 750	31.60
900	25	10	13 000	35.00
1 000	25	10	14 000	37.70
1 100	25	10	15 300	41.20

Tabella 8.7: Costi standard per valvole

Nominal diameter (mm)	New wall thickness (mm)	Rejection thickness (mm)	Value €	i per week €
300	6	2	120	0.32
400	8	3	140	0.38
500	10	6	205	0.55
600	16	6	275	0.74
700	16	6	395	1.06
800	16	6	430	1.16
900	20	6	585	1.57
1 000	20	6	640	1.72
1 000	25	6	760	2.04
1 100	20	6	690	1.86
1 100	25	6	830	2.23

Tabella 8.8: Costi standard per tubi di raccordo

Valvole

Residual value	in and out survey
Utilisation period	26 weeks
i	7.0 % of V per year or 0.269 % per week
M+R	related to type and quantity of the soil
Standard value	according to table of examples

Tubi di raccordo

Residual value	in and out survey
Utilisation period	26 weeks
i	7.0 % of V per year or 0.269 % per week
M+R	related to type and quantity of the soil
Standard value	according to table of examples

Condotte sommerse

Residual value	in and out survey
Utilisation period	15 weeks
i	7.0 % of V per year or 0.467 % per week
M+R	related to type and quantity of the soil
Standard value	according to table of examples

Nominal diameter (mm)	New wall thickness (mm)	Rejection thickness (mm)	Value €	i per week €
300	9	6	1 560	7.30
400	12	7	2 770	12.90
500	13	8	4 360	20.40
600	16	8	5 270	24.60
700	18	8	6 780	31.70
800	25	8	10 500	49.00
900	25	8	11 700	54.60
1 000	25	8	13 900	64.90
1 100	25	8	15 230	71.10

Tabella 8.9: Costi standard per condotte sommerse

8.4.3 Esempio di calcolo per draga aspirante semovente

Si considera una draga aspirante semovente con le seguenti caratteristiche:

- dislocamento a vuoto (W): 7 000 t
- potenza pompa draga (P_t): 4 500 kW
- potenza pompa jet (J_t): 1 600 kW
- potenza propulsione in navigazione (S): 12 000 kW.

Assumendo un'indicizzazione pari a 1.05 e 126 ore di servizio, che rappresentano circa 110 ore operative a settimana, dalla 8.8, senza indicizzazione, si ricava:

$$V = 83\,133\,192 \text{ €}$$

Questo valore va indicizzato moltiplicandolo per 1.05, ottenendo:

$$V = 87\,289\,852 \text{ €}$$

Si ricavano poi l'ammortamento e gli interessi settimanali:

$$D + i = 87\,289\,852 \cdot 0.292 = 254\,886 \text{ €}$$

Per calcolare i costi di manutenzione e riparazione, il valore base dovrebbe essere confrontato con la tabella 8.1: esso risulta compreso tra 80 400 000 e 89 800 000 €, che presentano rispettivamente una percentuale settimanale di 0.1117 e 0.1088. Si ricava quindi:

$$\frac{83\,133\,192 - 80\,400\,000}{89\,800\,000 - 80\,400\,000} \cdot (0.1117\% - 0.1088\%) + 0.1088\% = 0.1096\%$$

Quindi si ricava il costo di manutenzione e riparazione indicizzato:

$$M + R = 83\,133\,192 \cdot 0.1096\% = 91\,114 \cdot 1.05 = 95\,670 \text{ €}$$

Questo valore, non include il costo di riparazione e manutenzione dovuto all'usura del terreno sulle parti di scavo della draga. Come anticipato nel paragrafo 8.4.1, il 40 % del costo di riparazione e manutenzione rappresenta i costi fissi ed il 60 % quelli variabili. Dall'equazione 8.7 si calcola il fattore moltiplicativo F:

$$F = 1 + 0.6 \cdot \frac{(126 - 168)}{168} = 0.85$$

L' (M+R) totale, esclusa l'usura causata dal terreno sulle parti a contatto risulta quindi:

$$M + R = 95\,670 \cdot 85\% = 81\,320 \text{ €}$$

8.4.4 Esempio di calcolo per draga aspirante con disgregatore

Si considera una draga aspirante semovente con le seguenti caratteristiche:

- dislocamento a vuoto (W): 5 000 t
- potenza motore del disgregatore (C): 2 300 kW
- potenza pompe jet ($P + J$): 8 000 kW
- peso scatola del cambio del disgregatore (W_{cgb}): 65 t
- potenza propulsione in navigazione (S): 3 000 kW.

La draga è diesel-elettrica ed equipaggiata con una perforatrice flessibile. Assumendo un'indicizzazione pari a 1.10 e 112 ore di servizio, che rappresentano circa 80 ore operative a settimana, dalla 8.9, senza indicizzazione, si ricava:

$$V = 74\,659\,113 \text{ €}$$

Questo valore va indicizzato moltiplicandolo per 1.10, ottenendo:

$$V = 82\,125\,024 \text{ €}$$

Si ricavano poi l'ammortamento e gli interessi settimanali:

$$D + i = 82\,125\,024 \cdot 0.371 = 304\,684 \text{ €}$$

Per calcolare i costi di manutenzione e riparazione, il valore base dovrebbe essere confrontato con la tabella 8.2: esso risulta compreso tra 71 700 000 e 8 120 000 €, che presentano rispettivamente una percentuale settimanale di 0.1259 e 0.1217. Si ricava quindi:

$$\frac{74\,659\,113 - 71\,700\,000}{81\,200\,000 - 71\,700\,000} \cdot (0.1259\% - 0.1217\%) + 0.1217\% = 0.1230\%$$

Quindi si ricava il costo di manutenzione e riparazione indicizzato:

$$M + R = 74\,659\,113 \cdot 0.1230\% = 91\,831 \cdot 1.10 = 101\,014 \text{ €}$$

Questo valore, non include il costo di riparazione e manutenzione dovuto all'usura del terreno sulle parti di scavo della draga. Come anticipato nel paragrafo 8.4.1, il 40 % del costo di riparazione e manutenzione rappresenta i costi fissi ed il 60 % quelli variabili. Dall'equazione 8.9 si calcola il fattore moltiplicativo F:

$$F = 1 + 0.6 \cdot \frac{(112 - 168)}{168} = 0.80$$

L' (M+R) totale, esclusa l'usura causata dal terreno sulle parti a contatto risulta quindi:

$$M + R = 101\,014 \cdot 80\% = 80\,811 \text{ €}$$

8.5 Prezzi unitari di riferimento

Si riportano sul seguito alcune voci relative ai prezzi unitari di riferimento per lavori di dragaggio e ripascimento; essi si intendono comprensivi di oneri di sicurezza, spese generali e utili d'impresa.

- Formazione di ripascimento della spiaggia con sabbia proveniente da dragaggio, con refluimento fino alla distanza massima di 1 500 *m*, mediante draga a refluizione dotata di motore di opportuna potenza, omologazione per la navigazione in mare, assistenza navale e terrestre, compresa la sistemazione del materiale secondo gli elaborati grafici di progetto.

7.62 €/m³

- Formazione di ripascimento della spiaggia con sabbia proveniente da escavo di area litoranea emersa o stoccata presso discarica autorizzata, compreso il carico, il trasporto e la posa in opera, secondo gli elaborati grafici di progetto

a) fino alla distanza di 5 <i>Km</i>	3.97 €/m³
b) distanza da 5 <i>Km</i> a 10 <i>Km</i>	5.67 €/m³
c) distanza da 10 a 20 <i>Km</i>	8.84 €/m³
d) distanza da 20 a 30 <i>Km</i>	10.76 €/m³
e) distanza oltre 30 <i>Km</i>	12.05 €/m³

- Ripascimento artificiale del litorale con sabbia proveniente da spiaggia. Nel prezzo si intendono compresi l'asportazione del materiale, il carico e trasporto del materiale con mezzi meccanici fino all'area di accumulo; il carico della sabbia su idonei mezzi marittimi, il trasporto della sabbia fino agli specchi acquei antistanti le zone di intervento, il refluimento a riva del materiale, all'interno di apposite casse di colmata da realizzarsi preventivamente a terra, il trasporto della sabbia dalle casse di colmata fino ad apposite trincee procedendo con continuità ed omogeneità lungo la riva, la formazione della trincea di cui sopra, parallelamente alla riva con accumulo del materiale scavato in forma di duna a monte, la stesa della sabbia apportata, in modo da assicurare il successivo ricoprimento e livellamento con la sabbia locale già accumulata, la sistemazione dell'area di prelievo al termine dei lavori.

9.12 €/m³

- Escavazione di materiale sabbioso e ripascimento mediante draga autorefluente. Nel prezzo si intendono compresi i mezzi necessari per lo scavo, il refluimento (comprese le relative condotte) o trasporto a riva o nelle altre zone indicate all'interno dell'area dei lavori.

4.79 €/m³

- Ripascimento artificiale del litorale, prospiciente e limitrofo le zone oggetto dei lavori, con sabbia provenienti da cava, con trasporto via terra, mediante il carico presso l'area di prelievo, il trasporto fino alla zona di intervento, l'accumulo sull'arenile in forma di dune e la successiva stesa in battigia.

21.32 €/m³

Capitolo 9

Contesto normativo

9.1 Quadro di riferimento internazionale

Nel panorama internazionale i contributi normativi riguardo alla movimentazione dei sedimenti marini risultano carenti di una vera e propria regolamentazione specifica ed esauriente. Le più importanti convenzioni internazionali e le più approfondite trattazioni si riferiscono, infatti, al problema dell'inquinamento marino, dettando, in via immediata e diretta, regole e principi orientati alla salvaguardia e al recupero dell'ecosistema marino e, solo marginalmente, rivolte alla questione del dragaggio. In tabella 9.1 è riportato l'elenco dei principali riferimenti normativi internazionali.

• <i>OSPAR</i> ¹ <i>Commission</i> , 1992 - Convenzione per la prevenzione dell'ambiente marino del nord-est Atlantico
• <i>UNEP-MAP</i> ² , 1995 - Protocollo per la protezione dell'ambiente marino e delle regioni costiere del Mediterraneo, (UNEP-MAP 1995b)
• <i>UNEP-MAP</i> , 1995 - Protocollo per la prevenzione e l'eliminazione dell'inquinamento nel Mar Mediterraneo prodotto dagli scarichi effettuati da navi e aeromobili o da incenerimento in mare, (UNEP-MAP 1995a)
• <i>IMO</i> ³ , 1996 - Protocollo per la prevenzione e l'eliminazione dell'inquinamento marino generato dallo scarico in mare di rifiuti e altre sostanze, (IMO 1996)
• <i>IMO</i> , 1997 - Linee guida specifiche per la sistemazione del materiale dragato, (IMO 1997)
• <i>IMO</i> , 2000 - Linee guida per la sistemazione di rifiuti o altro materiale che può essere scaricato, (IMO 2000)
• <i>UNEP-MAP</i> , 2005 - Linee guida per la movimentazione di materiali geologici inerti e incontaminati, (UNEP-MAP 2005)

Tabella 9.1: Elenco delle principali convenzioni internazionali

Convenzione di Londra del 1972

La Convenzione sulla prevenzione dell'inquinamento marino da immersione (scarico) di rifiuti e altre sostanze è stata adottata a Londra il 13 novembre 1972, come risultato di una Conferenza intergovernativa organizzata dal Governo britannico: dopo l'entrata in vigore internazionale della Convenzione (30 agosto 1975), l'IMO (Organizzazione marittima internazionale) è stata incaricata di svolgere i relativi compiti di Segretariato.

L'Italia ha ratificato la Convenzione con legge 2 maggio 1983, n. 305 e la Convenzione è entrata in vigore nel nostro Paese il 30 maggio 1984.

La Convenzione ha un carattere globale e contribuisce al controllo internazionale e alla prevenzione dell'inquinamento marino.

La Convenzione proibisce lo scarico di alcuni materiali pericolosi, richiedendo un'autorizzazione speciale preventiva per l'immersione di altri materiali identificati, nonché un'autorizzazione preventiva generale per un ulteriore gruppo di rifiuti e sostanze.

Lo scarico, o immersione, viene definito nella Convenzione quale collocazione intenzionale in mare di rifiuti o altre sostanze da parte di imbarcazioni, aerei, piattaforme e altre strutture artificiali; anche la collocazione deliberata di imbarcazioni o piattaforme è compresa nella definizione in questione. Vengono esclusi dai divieti, tuttavia, i rifiuti derivanti dallo sfruttamento di risorse minerarie nel fondo marino; inoltre si fa eccezione anche nei casi in cui l'immersione di imbarcazioni si renda necessaria per la salvezza di vite umane.

Le Parti contraenti concordano nel designare un'Autorità che si occupi dei permessi, tenga registri e operi il monitoraggio delle condizioni ambientali del mare. Il monitoraggio e la ricerca scientifica sono altresì incoraggiati mediante forme di cooperazione a livello regionale.

Appositi Allegati alla Convenzione elencano i rifiuti che non possono essere oggetto di scarico e altri per i quali si richiede un'autorizzazione speciale. Un terzo Allegato riporta i criteri per il rilascio delle autorizzazioni, in connessione alla natura dei rifiuti, alle caratteristiche del luogo di scarico e ai metodi di collocazione dei materiali da immergere.

Nel corso degli anni la Convenzione del 1972 è stata più volte emendata: le procedure di emendamento dettate dalla Convenzione stessa prevedono (art. XV) che le modifiche agli Allegati entrano in vigore per consenso tacito, salvo la possibilità di notifica della non accettazione, mentre gli emendamenti all'articolato vincolano solo gli Stati che esplicitamente li accettano.

Il 12 ottobre 1978 sono stati adottati emendamenti all'Allegato I, con riferimento all'incenerimento in mare di rifiuti o altre sostanze, entrati in vigore l'11 marzo 1979; altri emendamenti – adottati in pari data e concernenti nuove procedure

¹OSPAR è il meccanismo attraverso il quale quindici governi delle coste occidentali e bacini europei, insieme alla Comunità Europea, cooperano al fine di proteggere l'ambiente marino dell'Atlantico nord-orientale. È iniziato nel 1972 con la Convenzione di Oslo contro il dumping, successivamente ampliato dalla Convenzione di Parigi del 1974. Queste due convenzioni sono state unificate, aggiornate e prorogate dalla Convenzione OSPAR del 1992.

²Il MAP è il Piano d'Azione per il Mediterraneo: un impegno di cooperazione che coinvolge ventuno paesi che si affacciano sul Mediterraneo, nonché l'Unione europea. Attraverso il MAP, i contraenti della Convenzione di Barcellona e dei suoi protocolli sono determinati ad affrontare le sfide della protezione dell'ambiente marino e costiero, mentre promuovono piani regionali e nazionali per realizzare uno sviluppo sostenibile.

³Organizzazione Marittima Internazionale - è l'agenzia delle Nazioni Unite, specializzata nella sicurezza della navigazione e della prevenzione dell'inquinamento marino causato dalle navi.

per la risoluzione delle controversie – non hanno ancora raggiunto la prescritta adesione di due terzi delle Parti contraenti e non sono pertanto entrati in vigore.

Il 24 settembre 1980 sono stati adottati emendamenti a quelli del 1978 sull'incenerimento, nel senso di specificare un elenco di sostanze di cui è bensì permesso l'incenerimento, ma per le quali si devono adottare particolari accorgimenti; gli emendamenti in questione sono entrati in vigore l'11 marzo 1981.

Il 3 novembre 1989 sono stati adottati emendamenti – in vigore dal 19 maggio 1990 – relativi alle procedure per il rilascio di autorizzazioni ai sensi dell'Allegato III della Convenzione del 1972, i quali accentuano l'importanza del momento scientifico-informativo preventivo nella valutazione dell'impatto degli scarichi in mare.

Il 12 novembre 1993, infine, sono stati adottati emendamenti – in vigore dal 20 febbraio 1994 – che proibiscono lo scarico in mare di rifiuti radioattivi a bassa emissione, oltre a interdire l'incenerimento in mare di rifiuti industriali e il loro scarico (quest'ultima previsione a partire dal 31 dicembre 1995), (Convenzione 1972).

Protocollo del 1996 alla Convenzione di Londra

Il Protocollo del 1996, in Italia ancora disegno di legge N. 1574 della sedicesima Legislatura, si pone come sostitutivo dell'intera Convenzione del 1972, rappresentando un deciso mutamento nell'approccio alla questione dell'utilizzazione del mare come deposito di materiali di scarto.

Mentre la Convenzione del 1972 consente gli scarichi in mare, purché vengano rispettate determinate condizioni – la cui severità varia in rapporto ai rischi ambientali che i vari materiali di scarto comportano – e purché non siano mai oggetto di scarico i materiali elencati in una 'lista nera', il Protocollo del 1996 è assai più restrittivo.

La prima rilevante innovazione è nell'articolo 3, ove si introduce il cosiddetto 'approccio precauzionale', in base al quale, anche in mancanza di prove scientifiche conclusive, è necessario adottare appropriate misure preventive qualora vi sia motivo di ritenere che l'introduzione nell'ambiente marino di rifiuti o sostanze analoghe possa causare danni. Inoltre, l'articolo 3 stabilisce il principio di carattere generale dell'imputazione dei costi degli inquinamenti a chi se ne è reso responsabile. Le Parti contraenti dovranno comunque evitare che l'inquinamento, a seguito di tali previsioni, venga semplicemente trasferito da un settore all'altro dell'ecosistema.

L'articolo 4 afferma che le Parti contraenti dovranno proibire lo scarico di qualunque rifiuto o altra sostanza, ad eccezione di quelle elencate nell'Allegato 1. Si tratta nella fattispecie di rifiuti di dragaggio, di fanghi di epurazione, di rifiuti ittici, organici o industriali, di navi, piattaforme o altre strutture artificiali, di materiale geologico inerte, di materiale organico di origine naturale, di oggetti voluminosi in ferro, acciaio, cemento armato, ma questo solo in contesti marini particolarmente isolati. L'articolo 4 in commento concretizza il rovesciamento nell'approccio al problema, limitando l'elencazione alle sole sostanze e materiali di cui è permesso lo scarico, che dunque si intende vietato in ogni altra eventualità: come in precedenza illustrato, invece, la Convenzione del 1972 elencava in allegato i rifiuti e le sostanze che non possono essere oggetto di scarico.

L'articolo 8 introduce peraltro talune eccezioni alle previsioni dell'articolo 4, nel senso di consentire lo scarico, l'immersione o l'incenerimento, qualora si verifichino cause di forza maggiore, dovute ad esempio ad eventi atmosferici, ovvero qualora alcune sostanze o installazioni costituiscano pericolo per la vita umana o la sicurezza della navigazione.

Per quanto concerne l'incenerimento in mare di rifiuti, il Protocollo, all'articolo 5, riprende le proibizioni già in vigore in base agli emendamenti del 1993.

L'articolo 6 del Protocollo risponde invece ad una preoccupazione invalsa negli anni più recenti in merito alla pratica di esportare rifiuti, che già ai sensi della Convenzione del 1972 non potevano essere scaricati in mare, verso Stati non Parti della Convenzione: viene esplicitamente vietato alle Parti contraenti l'invio di rifiuti o altre sostanze in altri Paesi allo scopo di operarne lo scarico o l'incenerimento in mare.

L'articolo 9 richiede alle Parti contraenti di designare una o più Autorità con il compito di rilasciare le autorizzazioni previste dal Protocollo, di registrare la natura e le quantità delle sostanze per le quali i permessi sono stati rilasciati, di contribuire al monitoraggio sullo stato dell'ambiente marino. Le Autorità di ciascuna Parte contraente sono competenti per il rilascio di autorizzazioni concernenti i rifiuti caricati sul proprio territorio, ovvero i rifiuti caricati su imbarcazione o aereo battente la propria bandiera, se il carico è avvenuto nel territorio di uno Stato non Parte del Protocollo in esame. Le Parti contraenti riunite designano un organo sussidiario (Gruppo scientifico), incaricato di esaminare i rapporti che le singole Parti redigono in merito alle misure nazionali di applicazione del Protocollo in esame, nonché all'efficacia di tali misure attuative. Le riunioni delle Parti contraenti sono individuate (articolo 18) come il principale strumento di valutazione e di proposta in merito all'applicazione del Protocollo. Analogamente, l'articolo 10 stabilisce che ciascuna delle Parti è competente, nell'applicare le misure – anche coercitive – di attuazione del Protocollo, anzitutto nei confronti di navi e aerei battenti la sua bandiera, poi nei riguardi di navi e aerei, che caricano sul suo territorio rifiuti da immergere in mare, e infine di navi, aerei o installazioni artificiali, che effettuino operazioni di scarico in mare in zone soggette alla giurisdizione di detta Parte contraente. Eccezione a tale competenza è costituita dalle navi e aerei dotati di immunità sovrana ai sensi del diritto internazionale, per i quali comunque la Parte di appartenenza vigila a che non agiscano contrariamente alle previsioni del Protocollo.

L'articolo 11 evidenzia la consapevolezza dell'importanza della dimensione attuativa, stabilendo dettagliate procedure di esecuzione che prevedono tra l'altro, non oltre due anni dall'entrata in vigore del Protocollo, una riunione delle Parti al fine di stabilire i necessari meccanismi di valutazione e di promuovere il rispetto delle previsioni da parte degli Stati contraenti.

Gli articoli 12-14 prevedono forme varie di cooperazione tra le Parti, sia a livello regionale, sia per quanto concerne l'assistenza tecnica e la ricerca scientifica finalizzate alla riduzione dell'inquinamento e la messa in sicurezza dei rifiuti. Le Parti si impegnano inoltre (articolo 15) “ad elaborare procedure concernenti la responsabilità che sorge dall'immersione o dall'incenerimento in mare di rifiuti o di altre materie”.

La risoluzione di eventuali controversie è disciplinata all'articolo 16, che, in difetto di risoluzione per via negoziale, rinvia per le eventuali procedure arbitrali all'Allegato 3, oppure alle procedure di cui all'art. 287 della Convenzione delle Nazioni Unite del 1982 sul diritto del mare.

Gli articoli 21 e 22 dettano previsioni sulle procedure di emendamento: gli emendamenti relativi agli articoli del Protocollo entreranno in vigore il 60° giorno successivo al raggiungimento di due terzi delle ratifiche o accettazioni delle Parti, mentre le modifiche agli Allegati entrano in vigore mediante procedura di tacita accettazione, non oltre 100 giorni dall'adozione, e non sono vincolanti per le Parti che esplicitamente hanno espresso il proprio diniego.

L'articolo 26, infine, contiene una clausola transitoria in base alla quale qualunque Stato che, non essendo Parte della Convenzione del 1972, manifesti il proprio consenso a vincolarsi al Protocollo del 1996 prima dell'entrata in vigore di esso o entro i cinque anni ad essa successivi; potrà nel contempo notificare di non essere in grado di rispettare le disposizioni del Protocollo, e ciò per un periodo non superiore a cinque anni. La deroga non potrà in nessun caso riguardare l'incenerimento in mare di rifiuti o lo scarico di materiali radioattivi. L'articolo 27 prevede peraltro anche l'eventualità del ritiro dal Protocollo di una delle parti, che potrà avvenire non prima di due anni successivi all'entrata in vigore del protocollo per quella Parte contraente, (Protocollo 1996).

Dunque, in materia di gestione delle operazioni di movimentazione dei fondali, uno dei principali riferimenti è la Convenzione di Londra del 1972, inerente le specifiche attività di *Dumping*. Ad essa è annessa la risoluzione di approvazione del *Dredged Material Assessment Framework*, documento che definisce le linee guida per orientare scelte ed operazioni relative al dragaggio dei porti. Agli stati sono forniti parametri funzionali alla determinazione della sorte dei materiali di risulta dell'attività di dragaggio e quindi, di ogni decisione relativa allo sversamento o meno degli stessi in mare. Il materiale di risulta viene considerato come una 'risorsa' da recuperare, piuttosto che un materiale di rifiuto. In considerazione di ciò dunque, un'alternativa da preferire allo scarico in mare è l'utilizzo benefico dei materiali dragati con o senza specifici trattamenti, anche perchè è ormai chiaro che il fondo del mare non può essere utilizzato come una discarica, in quanto non possiede una capacità illimitata di assimilazione e smaltimento.

Si riportano sul seguito ulteriori Convenzioni che non riguardano esclusivamente il tema del dragaggio ma si riferiscono, in generale, all'inquinamento marino, individuando cause e descrivendo gli effetti nocivi sull'ambiente, in relazione ad un determinato contesto geografico.

Convenzione OSPAR del 1992

La Convenzione OSPAR ha la finalità di proteggere l'ambiente marino del nord-est Atlantico. Alla Convenzione, firmata a Parigi nel 1992 ed entrata in vigore nel 1998, aderiscono 16 Stati Europei e la Commissione Europea.

Nel 2007 le parti contraenti hanno apportato modifiche agli allegati della convenzione, in modo da consentire lo stoccaggio di CO_2 in formazioni geologiche situate sotto il fondo marino e adottato una decisione per lo stoccaggio in sicurezza, sotto il profilo ambientale, di flussi di CO_2 in formazioni geologiche ed emanato linee-guida OSPAR per la valutazione e la gestione del rischio connesso a tale attività.

Hanno infine adottato una decisione finalizzata a vietare lo stoccaggio di CO_2 nella colonna d'acqua marina e sul fondo marino, alla luce dei potenziali effetti negativi, (Convenzione 1992b).

Convenzione di Bucarest del 1992

La Convenzione sulla protezione del Mar Nero contro l'inquinamento è stata firmata a Bucarest nell'aprile 1992, ed è stata ratificata da tutte e sei le assemblee legislative dei paesi del Mar Nero all'inizio del 1994. È la struttura di base di un accordo e di tre protocolli specifici, che sono:

- il controllo delle fonti terrestri d'inquinamento;
- lo scarico di rifiuti;

- un'azione comune in caso di incidenti (come fuoriuscite di petrolio).

L'attuazione della Convenzione è gestita dalla Commissione per la protezione del Mar Nero contro l'inquinamento e il suo Segretariato permanente ad Istanbul, Turchia, la quale comprende un rappresentante di ciascuna delle parti contraenti (Bulgaria, Georgia, Romania, Russia, Turchia e Ucraina), (Convenzione 1992a).

Convenzione di Helsinki del 1992

La convenzione è stata firmata a nome della Comunità europea ad Helsinki il 18 marzo 1992. Essa istituisce un quadro per la cooperazione tra i Paesi membri della Commissione economica delle Nazioni Unite per l'Europa (UNECE) sulla prevenzione e il controllo dell'inquinamento dei corsi d'acqua di confine, garantendo l'uso razionale delle risorse idriche in vista di uno sviluppo sostenibile.

Essi devono:

- garantire che le acque di confine siano gestite in modo razionale, ecologico;
- garantire che le acque di confine siano utilizzate in maniera ragionevole ed equa;
- garantire la conservazione e il ripristino degli ecosistemi.

La Convenzione promuove la cooperazione tra le parti confinanti per mezzo di accordi bilaterali e multilaterali per l'introduzione di politiche armonizzate, di programmi e di strategie per tutelare le acque di confine, (Convenzione 1995b).

Convenzione di Barcellona del 1976

La convenzione di Barcellona è stata adottata a Barcellona il 16 febbraio 1976 ed è stata modificata il 10 giugno 1995. Nel corso del tempo il suo mandato è stato ampliato, includendovi la pianificazione e la gestione integrata della zona costiera, e i protocolli elaborati nell'ambito di tale convenzione mirano a proteggere l'ambiente marino e costiero del Mediterraneo incoraggiando i piani regionali e nazionali che contribuiscono allo sviluppo sostenibile.

Le 22 parti contraenti⁴ della convenzione, adottano, singolarmente o congiuntamente, tutte le misure necessarie per proteggere e migliorare l'ambiente marino nella zona del Mar Mediterraneo onde contribuire al suo sviluppo sostenibile. Per conseguire tale obiettivo le parti s'impegnano a ridurre, a combattere e, per quanto possibile, a eliminare l'inquinamento in questa zona.

I principali obiettivi della convenzione sono:

- valutare e controllare l'inquinamento;
- garantire la gestione sostenibile delle risorse naturali marine e costiere;
- integrare l'ambiente nello sviluppo economico e sociale;
- proteggere l'ambiente marino e le zone costiere attraverso azioni volte a prevenire e a ridurre l'inquinamento e, per quanto possibile, a eliminarlo, sia esso dovuto ad attività svolte a terra o in mare;
- proteggere il patrimonio naturale e culturale;

⁴Albania, Algeria, Bosnia-Erzegovina, Cipro, Comunità europea, Croazia, Egitto, Francia, Grecia, Israele, Italia, Libano, Libia, Malta, Marocco, Monaco, Montenegro, Siria, Slovenia, Spagna, Tunisia, Turchia

- rafforzare la solidarietà tra i Paesi rivieraschi del Mediterraneo e contribuire al miglioramento della qualità della vita.

La convenzione incoraggia le parti a:

- instaurare un sistema di cooperazione e d'informazione per ridurre o eliminare l'inquinamento dovuto a una situazione critica nel Mediterraneo;
- istituire un sistema di sorveglianza continua dell'inquinamento; cooperare fra loro nel campo della scienza e della tecnologia;
- elaborare procedure adeguate per l'accertamento della responsabilità e la compensazione dei danni in caso di inquinamento derivante dalla violazione dei termini della convenzione;
- elaborare procedure che consentano di verificare l'applicazione della convenzione.

La convenzione prevede meccanismi di risoluzione delle controversie e di arbitrato per risolvere eventuali controversie tra le parti circa l'interpretazione o l'applicazione della convenzione.

Il programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) svolge le funzioni di segretariato nel quadro dell'attuazione della convenzione (convocazione e preparazione delle riunioni, coordinamento, ecc.).

La convenzione è stata modificata nel 1995. Le principali modifiche riguardano:

- l'estensione del campo d'applicazione geografico della convenzione al litorale;
- l'applicazione del principio di precauzione;
- l'applicazione del principio «chi inquina paga»;
- la promozione degli studi d'impatto;
- la protezione e preservazione della diversità biologica;
- la lotta all'inquinamento dovuto a movimenti transfrontalieri di rifiuti pericolosi;
- l'accesso all'informazione e la partecipazione del pubblico.

Dal sistema normativo internazionale possono essere estrapolati i seguenti principi base:

- Il *Principio di precauzione*: possono essere scaricate in mare solo determinate sostanze con un percorso specifico basato sulla caratterizzazione dei sedimenti, sull'ipotesi di impatto e sul successivo monitoraggio;
- Il *Principio di 'chi inquina paga'*: si attribuisce al soggetto che introduce sostanze inquinanti nell'ambiente, la responsabilità di sostenere i costi per le misure di riduzione dell'inquinamento prodotto;
- Il *Principio di gestione integrata* delle zone costiere: ogni intervento in questa fascia di territorio deve essere contestualizzato in una gestione che contempli tutti gli aspetti socio-ambientali, oltre che prettamente economici.

La Convenzione di Barcellona ha prodotto sette Protocolli per affrontare aspetti specifici della conservazione ambientale del Mediterraneo, quello che interessa la materia dei dragaggi ed in particolare lo scarico di materiale in mare è il *Protocollo Dumping* per la prevenzione e l'eliminazione dell'inquinamento del mar Mediterraneo derivante da scarichi di imbarcazioni ed aerei o per incenerimento in mare. Questo Protocollo mira alla graduale eliminazione dello scarico in mare di rifiuti, secondo gli stessi principi della Convenzione di Londra, ed è uno strumento a livello globale che proibisce lo scarico di rifiuti pericolosi da navi ed aerei così come l'incenerimento di rifiuti pericolosi in mare. L'area di divieto prevista nel Protocollo comprende sia il fondale che il sottosuolo del mar Mediterraneo, (Convenzione 1995a).

9.2 Quadro di riferimento comunitario

Sono riportati in tabella 9.2 i principali riferimenti normativi europei: le direttive non sono obbligatorie in tutti i loro elementi, in quanto, dettando solo un obbligo di risultato, lasciano spazio all'iniziativa normativa di ogni stato cui sono dirette. La libertà dello Stato non è assoluta in quanto deve garantire l'effetto voluto dall'Unione. La posizione in cui si inserisce la dimensione comunitaria, è nel mezzo tra il contesto internazionale, che non ha un'azione vincolante, e quello nazionale.

-
- Direttiva 2000/60/CE del 23 ottobre 2000 *'quadro per l'azione comunitaria in materia di acque'*, (Direttiva 2012a)
-
- Direttiva 2455/2001/CE del 20 novembre 2001 *'istituzione di un elenco di sostanze prioritarie in materia di acque'*, (Direttiva 2012c)
-
- Direttiva 2008/32/CE del 11 marzo 2008 modifica la direttiva 2000/60/CE per quanto riguarda le competenze di esecuzione conferite alla Commissione, (Direttiva 2012b)
-
- Direttiva 2008/56/CE del 17 giugno 2008 *'quadro per l'azione comunitaria nel campo della politica per l'ambiente marino'*, (Direttiva 2008)
-

Tabella 9.2: Elenco dei principali riferimenti normativi europei

Per quanto concerne la Direttiva 2000/60/CE, con l'articolo 4, gli Stati membri si impegnano, per le acque superficiali, a proteggere, migliorare e ripristinare tutti i corpi idrici e ad attuare le misure necessarie per impedire il deterioramento, al fine di raggiungere un buono stato delle acque superficiali stesse entro 15 anni dall'entrata in vigore della direttiva. L'articolo 11 fissa un programma di misure, ossia, ciascuno Stato membro prepara un programma di misure allo scopo di realizzare gli obiettivi di cui all'articolo 4. Tali programmi di misure possono fare riferimento a misure derivanti dalla legislazione adottata a livello nazionale. L'articolo 16 propone invece delle strategie per combattere l'inquinamento idrico.

La direttiva 2008/56/CE, tramite l'articolo 5, fissa l'elaborazione, entro il 2015, di un programma di misure finalizzate al conseguimento o al mantenimento di un buono stato ecologico, che deve essere avviato entro il 2016, dove, per *buono stato ecologico*, si intende che:

- l'integrità del fondo marino debba essere ad un livello tale da garantire che le strutture e le funzioni degli ecosistemi siano salvaguardate e gli ecosistemi bentonici, in particolare, non abbiano subito danni;

- le concentrazioni dei contaminanti presentino livelli che non diano origine ad effetti inquinanti.

Gli Stati membri identificano quindi, per ogni regione o sottoregione marina interessata, le misure necessarie al fine di conseguire o mantenere nelle loro acque marine un buono stato ecologico.

9.3 Quadro di riferimento nazionale

Per quanto riguarda il quadro di riferimento nazionale, la prima ripartizione da fare è tra area *SIN*⁵, il cui elenco è riportato in tabella 9.3, o area *non SIN*. Le prime infatti hanno la regolamentazione specifica che viene rappresentata e che il Decreto legge 24 gennaio 2012 rettifica.

È recente il ritorno dallo Stato alle Regioni della competenza del disinquinamento di 18 dei 57 Siti di interesse nazionale da risanare, i quali diventano Siti di interesse regionale *Sir* (tabella 9.4): l'ex ministro dell'Ambiente, Corrado Clini, ha firmato il decreto che ridisegna l'elenco dei Sin e concentra l'attenzione dello Stato su 39 aree di particolare complessità ambientale per la presenza di impianti chimici o di contaminazioni più pericolose, restituendo la competenza di controllo e risanamento alle Regioni per 18 aree che non hanno le caratteristiche per essere classificate di interesse nazionale. I siti che tornano regionali non soddisfano i requisiti dell'articolo 252 del decreto legislativo del 2006 'Norme in materia ambientale', come modificato dall'articolo 36 bis della legge del 7 agosto 2012 che ha convertito in legge le 'Misure urgenti per la crescita del Paese', (D.Lgs 2012). Per le zone poste in aree non comprese in SIN, si fa riferimento alla Legge 31 luglio 2002 – n. 179, (L. 2012a), che all'Art. 21 (Autorizzazione per gli interventi di tutela della fascia costiera) specifica le competenze delle Regioni e quelle dello Stato e all'articolo 109, comma 2, del D.Lgs 3 aprile 2006, n. 152 (che peraltro riprende quanto già riportato nell'art.35 del D.Lgs 152/99).

Nella tabella 9.5 sono riportati i principali riferimenti normativi nazionali e le linee guida dell'ICRAM.

In Italia il D.Lgs. 152/2006 regola l'immissione in mare del materiale derivante da attività di escavo di fondali marini e l'attività di posa in mare di cavi e condotte, in particolare:

- è consentita l'immersione deliberata in mare o in ambiti ad esso contigui, quali spiagge, lagune e stagni salmastri e terrapieni costieri, dei materiali di escavo di fondali marini;
- l'autorizzazione all'immersione in mare è rilasciata dall'autorità competente solo quando è dimostrata, nell'ambito della relativa istruttoria, l'impossibilità tecnica o economica del loro utilizzo ai fini di ripascimento o di recupero oppure del loro smaltimento alternativo.

L'articolo 48 del D.L. 1/2012 mira sostanzialmente a completare e migliorare la normativa; in particolare:

- si prevede che nei siti oggetto di interventi di bonifica di interesse nazionale, le operazioni di dragaggio possano essere svolte anche contestualmente alla predisposizione del progetto relativo alle attività di bonifica; esso è presentato dall'autorità portuale o, dove non istituita, dall'ente competente;

⁵Sito di interesse nazionale

- si prevede inoltre che i materiali derivanti dalle attività di dragaggio possano essere immessi o refluiti in mare nel rispetto dell'articolo 109 del D.Lgs. 152 del 3 aprile 2006;
- i materiali di dragaggio possono essere utilizzati anche per il ripascimento degli arenili e per formare terreni costieri su autorizzazione della regione territorialmente competente. I materiali derivanti dalle attività di dragaggio o da attività di dragaggio da realizzare nell'ambito di procedimenti di bonifica, che presentino all'origine o a seguito di trattamenti, livelli di inquinamento non superiori a quelli stabiliti, in funzione della destinazione d'uso, possono essere impiegati a terra.

Da notare infine che l'art. 24 del Decreto Legge 9 febbraio 2012, n. 5 (GU n.33 del 9-2-2012 - Suppl. Ordinario n. 27), entrato in vigore il 10 febbraio 2012, ha trasferito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare alle Regioni la competenza per l'istruttoria ed il rilascio delle autorizzazioni di Immersione in mare di materiale derivante da attività di escavo di fondali marini o salmastri o di terreni litoranei emersi di cui all'art. 109 del D. Lgs. 152/2006, fatta eccezione per gli interventi ricadenti in aree protette nazionali di cui alle leggi 31 dicembre 1982, n. 979 e 6 dicembre 1991, n. 394. Si riporta sul seguito la nota inviata alle Regioni dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare:

Come noto, l'art. 24 del Decreto Legge 9 febbraio 2012, n.5, entrato in vigore il 10 febbraio 2012 e convertito con Legge 4 aprile 2012, n. 35, ha trasferito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare alle Regioni la competenza per l'istruttoria ed il rilascio delle autorizzazioni di immersione in mare di materiale derivante da attività di escavo di fondali marini o salmastri o di terreni litoranei emersi di cui all'art. 109 del D. Lgs. 152/2006, fatta eccezione per gli interventi ricadenti in aree protette nazionali di cui alle leggi 31 dicembre 1982, n. 979 e 6 dicembre 1991, n. 394. Nelle more dell'emanazione del previsto Decreto interministeriale di cui al comma 2 del citato art. 109 del D. Lgs. 152/2006, che disciplina le modalità per il rilascio dell'autorizzazione alla immersione deliberata in mare del materiale di escavo di fondali marini o salmastri o di terreni litoranei emersi di cui alla lettera a), comma 1, del medesimo articolo 109, si evidenzia a codeste Amministrazioni regionali che la norma tecnica sin qui adottata da questo Ministero è il DM 24 gennaio 1996. Tuttavia, poichè come noto il Decreto ministeriale anzi citato non prevede specifici valori di riferimento per i parametri da indagare ed in considerazione degli obblighi internazionali quali la Convenzione di Londra del 1972 e la Convenzione di Barcellona - protocollo Dumping del 1995, si ritiene utile segnalare a queste Regioni che negli ultimi anni l'ISPRA, per la valutazione dei risultati delle analisi del materiale e l'espressione dei pareri propromici alle autorizzazioni in argomento ha utilizzato i valori soglia stabiliti nel 'Manuale per la movimentazione dei sedimenti marini', redatto nel 2007 dall'APAT e dall'ICRAM. (Min.Ambiente 2012).

Le linee guida dell'ICRAM⁶, si configurano come un punto di riferimento per le amministrazioni competenti in quanto affrontano le problematiche relative alla movimentazione del materiale in ambito marino e costiero, con particolare interesse per i dragaggi portuali, per i ripascimenti, per l'immersione in mare di materiale di escavo.

Punto forza del fascicolo e di conseguenza di una corretta gestione del materiale in questione è l'approfondita conoscenza della natura dei sedimenti, delle loro caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche: questo permette di valutare eventuali impatti sull'ambiente delle attività di dragaggio.

⁶oggi ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Sito di interesse nazionale	Provvedimento
Venezia Marghera	L. 426/98
Napoli Orientale	L. 426/98
Gela	L. 426/98
Priolo	L. 426/98
Manfredonia	L. 426/98
Brindisi	L. 426/98
Taranto	L. 426/98
Cengio e Saliceto	L. 426/98
Piombino	L. 426/98
Massa e Carrara	L. 426/98
Casal Monferrato	L. 426/98
Balangero	L. 426/98
Pieve Vergonte	L. 426/98
Sesto San Giovanni	L. 388/2000
Pioltello - Rodano	L. 388/2000
Napoli Bagnoli - Coroglio	L. 388/2000
Tito	D.M. 468/2001
Crotone - Cassano - Cerchiara	D.M. 468/2001
Fidenza	D.M. 468/2001
Laguna di Grado e Marano	D.M. 468/2001
Trieste	D.M. 468/2001
Cogoleto - Stoppani	D.M. 468/2001
Bari - Fibronit	D.M. 468/2001
Sulcis - Inglesiente - Guspinese	D.M. 468/2001
Biancavilla	D.M. 468/2001
Livorno	D.M. 468/2001
Terni Papigno	D.M. 468/2001
Emarese	D.M. 468/2001
Trento nord	D.M. 468/2001
Brescia - area Caffaro	L. 179/2002
Broni	L. 179/2002
Falconara Marittima	L. 179/2002
Serravalle Scrivia	L. 179/2002
Laghi di Mantova e polo chimico	L. 179/2002
Orbetello (area ex Sitoco)	L. 179/2002
Aree industriali di Porto Torres	L. 179/2002
Area industriale della Val Basento	L. 179/2002
Milazzo	L. 266/05
Bussi sul Tirino	D.M.Ambiente 28/05/08

Tabella 9.3: Elenco dei Siti di interesse nazionale

Sito di interesse nazionale	Provvedimento
Litorale Domizio Flegreo e Agro Aversano	L. 426/98
Pitelli	L. 426/98
Fiumi Saline Alento	D.M. 468/2001
Sassuolo - Scandiano	D.M. 468/2001
Frosinone	D.M. 468/2001
Cerro al Lambro	D.M. 468/2001
Milano - Bovisa	D.M. 468/2001
Basso bacino del fiume Chienti	D.M. 468/2001
Guglionesi II	D.M. 468/2001
Basse di Stura	D.M. 468/2001
Mardimago - Ceregnano	D.M. 468/2001
Bolzano	D.M. 468/2001
Aree del Litorale Vesuviano	L. 179/2002
Bacino del fiume Sacco	L. 248/05
Bacino Idrografico del fiume Sarno	L. 266/05
Le Strillaie	D. Lgs. 152/06
Pianura	D.M. Ambiente 11/04/08
La Maddalena	Ordinanza P.C.M. 19.11.2008

Tabella 9.4: Elenco dei Siti di interesse nazionale che tornano siti di interesse regionale

Principali riferimenti normativi nazionali
<ul style="list-style-type: none"> • L. 319 del 10 maggio 1976 e ss.mm.ii. <i>‘Norme per la tutela delle acque dall’inquinamento’</i>, (L. 2012b)
<ul style="list-style-type: none"> • D.P.R. 816 del 26 aprile 1977 <i>‘Fissazione delle linee di base del mare territoriale’</i>, (D.P.R. 2012)
<ul style="list-style-type: none"> • L. 979 del 31 dicembre 1982 <i>‘Disposizioni per la difesa del mare’</i>, (L. 2012d)
<ul style="list-style-type: none"> • L. 84 del 28 gennaio 1994 <i>‘Riordino della legislazione in materia portuale’</i>, (L. 2012c)
<ul style="list-style-type: none"> • D.M. del 24 gennaio 1996 <i>‘Direttive inerenti le attività istruttorie per il rilascio delle autorizzazioni di cui all’art. 11 della legge 10 maggio 1976, n.319 e successive modifiche ed integrazioni, relative allo scarico nelle acque del mare o in ambienti ad esso contigui, di materiali provenienti da escavo di fondali di ambienti marini o salmastri o di terreni litoranei emersi, nonché da ogni altra movimentazione di sedimenti in ambiente marino’</i>, (D.M. 2012b)
<ul style="list-style-type: none"> • L. 179 del 31 luglio 2002 <i>‘Disposizioni in materia ambientale’</i>
<ul style="list-style-type: none"> • D.M. 367 del 6 novembre 2003 <i>‘Regolamento concernente la fissazione di standard di qualità nell’ambiente acquatico per le sostanze pericolose, ai sensi dell’art. 3, comma 4, del D.Lgs. 11 maggio 1999, n.152’</i>, (D.M. 2012c)
<ul style="list-style-type: none"> • D.Lgs. 152 del 3 aprile 2006 e ss.mm.ii. <i>‘Norme in materia ambientale’</i>, (D.Lgs. 2012)
<ul style="list-style-type: none"> • D.M. 7 novembre 2008 <i>‘Disciplina delle operazioni di dragaggio nei siti di bonifica di interesse nazionale’</i>, (D.M. 2012a)
<ul style="list-style-type: none"> • D.M. 56 del 14 aprile 2009 <i>‘Criteri tecnici per il monitoraggio dei corpi idrici e l’identificazione delle condizioni di riferimento per la modifica delle norme tecniche del D.Lgs. 152 del 3 aprile 2006, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell’articolo 75, comma 3, del D.Lgs. medesimo’</i>, (D.M. 2012d)
<ul style="list-style-type: none"> • D.L. 1 del 24 gennaio 2012 <i>‘Disposizioni urgenti per la concorrenza, lo sviluppo delle infrastrutture e la competitività’</i>
<ul style="list-style-type: none"> • D.L. 5 del 9 febbraio 2012 <i>‘Disposizioni urgenti in materia di semplificazione e di sviluppo’</i>, (D.L. 2012)
Linee guida
<ul style="list-style-type: none"> • ICRAM-APAT <i>‘Manuale per la movimentazione dei sedimenti marini’</i>, (ICRAM-APAT 2007)

Tabella 9.5: Elenco dei principali riferimenti normativi nazionali e linee guida

Conclusioni

In questo studio si è analizzato, nella prima parte, il dragaggio, a partire dalle sue origini fino alle più recenti innovazioni nel campo ambientale; questo ha permesso di comprendere come tale realtà si sia evoluta da semplice operazione di escavo ad insieme di strategie, tecniche e pianificazioni per la gestione del territorio. Si è discusso quindi delle tecniche di dragaggio meccanico e idraulico, caratterizzando il ciclo di dragaggio in ogni sua singola fase, per comprendere come ogni progetto sia una realtà unica, che richiede mezzi specifici e valutazioni appropriate. Ancora, si sono prese in considerazione le tendenze odierne del settore, riguardanti soprattutto l'utilizzo benefico del materiale ed il dragaggio ambientale. I recenti progressi nello sviluppo delle apparecchiature e nella progettazione, hanno ridotto la formazione dei residui post dragaggio e hanno permesso di soddisfare elevati standard di pulizia. Tutte le draghe smuovono sedimenti, ma la rimozione può essere generalmente raggiunta con un tasso di risospensione accettabile: la tecnologia di posizionamento consente ora una linea di taglio che ammette la precisione del centimetro. La conoscenza delle condizioni del sito e delle caratteristiche dei sedimenti è fondamentale per la valutazione di un dragaggio come componente di un piano di rimedio. Gli effetti ambientali di un dragaggio, siano essi negativi o positivi, devono essere chiaramente identificati in fase di progetto e sono una combinazione di:

- attrezzature utilizzate;
- metodo di esecuzione prescelto;
- tipo di progetto;
- condizioni del sito di dragaggio, del trasporto e del sito di deposito/trattamento;
- esperienza di chi esegue i lavori.

Una riduzione degli effetti ambientali richiede di indirizzare tutti questi parametri. L'impatto ambientale di un certo tipo di attrezzatura di dragaggio deve essere visto in un'ampia prospettiva: un significativo disturbo nel breve periodo può essere preferibile rispetto ad uno nel lungo periodo. Una valutazione dell'impatto ambientale specifica per ogni progetto è un prerequisito di una corretta valutazione del reale effetto delle operazioni di dragaggio ed è utile a stabilire le misure di mitigazione più economiche. Nel selezionare le più appropriate soluzioni per un determinato problema di riqualifica del materiale, dovrebbero essere considerate tutte le possibilità: utilizzo benefico, confinamento, trattamento o una combinazione di queste. Per ogni possibilità, esiste una serie di misure di controllo appropriate per ridurre o eliminare gli impatti negativi legati all'ambiente. Esse dovrebbero incontrare allo stesso tempo sia i requisiti ambientali che quelli tecnici ed economici. E' da sottolineare che non esiste una soluzione generale valida per tutti i progetti ma, ogni alternativa deve essere basata sulle condizioni specifiche della questione

in esame. Dovrebbero essere fatti più sforzi nell'ambito dell'utilizzo benefico del materiale, argomento che è anche trattato nel Protocollo alla Convenzione di Londra del 1972, come anche da altre convenzioni regionali. Da tenere presente il fatto che tale utilizzo benefico non necessariamente risponde a soluzioni sicure dal punto di vista ambientale. Il considerare i sedimenti come normali rifiuti da conferire in discarica è un'approssimazione estremamente grossolana, che non tiene conto della reale natura e delle potenzialità di riutilizzo dei sedimenti stessi. A tutt'oggi confrontarsi con il problema *sedimenti*, si riduce nel dragaggio e nel conferimento in discarica controllata del materiale proveniente da aree portuali. I CDF (Confined Disposal Facility), come il capping, non sono altro che interventi di confinamento del materiale, in realtà delle vere e proprie discariche che appartengono ad una mentalità di gestione del problema ormai superata. I successi ottenuti in molti Paesi con diversi tipi di trattamento testimoniano la possibilità di gestire i sedimenti come una risorsa che, dopo opportuni interventi, può tornare a far parte dell'ecosistema d'origine o essere utilizzato per altri scopi (ripascimento spiagge, bonifica, materiale da costruzione, ...). Particolare attenzione va attribuita ai trattamenti in situ, che nel caso di sedimenti contaminati risultano molto spesso di fatto irrealizzabili, ciò è dovuto alla presenza della colonna d'acqua sovrastante, alle condizioni al contorno poco controllabili, al confinamento dell'area estremamente difficoltoso. Si ha un pericolo di migrazione dei contaminanti molto elevato, anche a causa delle correnti, che spesso scoraggia l'impiego di questo tipo di tecnologie. Nelle ricerche degli ultimi anni le tecnologie più tradizionali come quelle di distruzione termica, di immobilizzazione e di estrazione, hanno lasciato il posto a trattamenti maggiormente *ecocompatibili*, come la *bioremediation* e la *phytoremediation* che sono risultate particolarmente promettenti per alcuni contesti di bonifica. Parte integrante del processo di riposizionamento del materiale dovrebbe essere il monitoraggio delle operazioni e del comportamento del materiale stesso dopo la conclusione dell'intervento, questo non fornisce solamente informazioni utili per la gestione del sito ma anche aumenta il livello di conoscenza dei sedimenti e del comportamento degli inquinanti.

Nella seconda parte della tesi si sono presentati due interventi: il ripascimento in località Cortellazzo ed il dragaggio della canaletta di accesso al porto di Lido e successivo refluimento in barena San Felice. Si è potuto osservare da vicino gli strumenti e le attrezzature discusse nei primi capitoli. Il primo caso di studio ha permesso di valutare la necessità del dragaggio ai fini del ripascimento per un litorale veneto in continua erosione, come quello del Cavallino: il risultato finale crea una spiaggia caratterizzata da materiale di ottima qualità e grado estetico e fornisce una parziale difesa del litorale. L'intervento alla canaletta di accesso al Porto di Lido evidenzia invece che il dragaggio contro l'interrimento della bocca fornisce del materiale utile alla consolidazione di quelle forme tipiche lagunari che si sono drasticamente ridotte nel corso degli ultimi anni, come le barene, le velme ed i bassifondi. Va precisato però che, anche se ciò esula dagli obiettivi di questo studio, l'utilizzo del dragaggio per tali scopi è solo una componente di una serie di rimedi che invece dovrebbero essere presi in considerazione nel loro insieme: la complessa situazione della Laguna richiede interventi concomitanti come la reintroduzione dei sedimenti (e delle portate) per limitare l'erosione e la riduzione del moto ondoso, ad esempio; analogamente per il litorale veneto occorre analizzare il problema dell'erosione e della mancanza di apporto sedimentario a monte.

Infine sono stati presentati i principali riferimenti normativi internazionali, comunitari e nazionali, per concludere che la necessità di una normativa in materia

di sedimenti è ormai impellente. In Italia solo recentemente si è iniziato a dare la giusta importanza al problema della corretta movimentazione e gestione dei sedimenti; si sta infatti cercando di programmare gli interventi a livello nazionale e di procedere ad una pianificazione che, in conformità alle disposizioni delle convenzioni internazionali vigenti, veda il materiale dragato non più come rifiuto da smaltire ma come risorsa da sfruttare. Tutto questo dovrebbe essere seguito dalla trasformazione in legge di quelle che fino ad oggi sono solamente delle linee guida, a cui si fa riferimento spesso solo a livello teorico. L'intervento legislativo oltre a fornire dei limiti specifici sul contenuto di contaminanti nei sedimenti, dovrebbe fornire anche indicazioni per una gestione integrata del problema. Un esempio di normativa all'avanguardia è quello Olandese che, oltre a scoraggiare il conferimento in discarica del materiale facilmente trattabile (con tasse ambientali ad hoc), incentiva con contributi pubblici la bonifica dei sedimenti ed infine promuove il reimpiego di questi ultimi per utilizzi benefici. Prendendo spunto da tali lungimiranti esempi, nonché dalle numerose Convenzioni Internazionali in materia, è auspicabile nel nostro Paese la realizzazione di un intervento normativo che faccia ordine in una questione quanto mai confusa e intricata.

Bibliografia

- 05, EnviCom Working Group
2002 *Environmental guidelines for aquatic, nearshore and upland confined disposal facilities for contaminated dredged material*, Report, Working group 5, PIANC, Bruxelles, (B).
- 10, EnviCom Working Group
2006 *Environmental risk assessment of dredging and disposal operations*, Report, Working group 10, PIANC, Bruxelles, (B).
- 10, MarCom Working Group
1986 *Disposal of dredged material at sea*, Report, Supplement to Bulletin no. 52, PIANC, Bruxelles, (B).
- 100, EnviCom Working Group
2009 *Dredging management practices for the environment*, Report 100, PIANC, Bruxelles, (B).
- 109, EnviCom Working Group
2009 *Long term management of confined disposal facilities for dredged material*, Report 109, PIANC, Bruxelles, (B).
- 14, EnviCom Working Group
2009 *Dredged material as a resource*, Report 104, PIANC, Bruxelles, (B).
- Bergeron, R.E., B.S. Cushing *et al.*
2000 «The Cable arm clamshell: development and track record for environmental dredging», in 20th Technical Conference, Western Dredging Association, Warwick, (RI).
- Bray, R.N.
2009 *A guide to cost standards for dredging equipment*, CIRIA, London, (GB).
- Convenzione
1972 *di Londra*, <http://www.imo.org>.
1992a *di Bucarest*, <http://ec.europa.eu>.
1992b *OSPAR*, <http://europa.eu>.
1995a *di Barcellona*, <http://europa.eu>.
1995b *di Helsinki*, <http://europa.eu>.
- Cossettini, Ing. Paola e Dott.sa Valeria Iacovone
2005 *Compatibilità delle sabbie per il ripascimento dei litorali: aspetti normativi ed ambientali*, Tesi di perfezionamento, Università degli Studi di Padova, Dipartimento IMAGE, Padova.

Csiti, Anna e T. Neville Burt

- 1999 *Reuse, Recycle or Relocate*, Environmental Aspects of Dredging, 5, CEDA, 2600 AL Delft, (NL).

Direttiva

- 2008 *2008/56/CE del 17 giugno 2008. 'quadro per l'azione comunitaria nel campo della politica per l'ambiente marino'*, <http://eur-lex.europa.eu>.
- 2012a *2000/60/CE del 23 ottobre 2000. 'quadro per l'azione comunitaria in materia di acque'*, G.U.E. n.327/L del 22 dicembre 2000, <http://www.salute.gov.it>.
- 2012b *2008/32/CE del 11 marzo 2008. 'modifica la direttiva 2000/60/CE per quanto riguarda le competenze di esecuzione conferite alla Commissione'*, G.U.E. L 164/19 del 25 giugno 2008, <http://eur-lex.europa.eu>.
- 2012c *2455/2001/CE del 20 novembre 2001. 'istituzione di un elenco di sostanze prioritarie in materia di acque'*, G.U.E. L 331 del 15 dicembre 2001, <http://eur-lex.europa.eu>.

D.L.

- 2012 *9 febbraio 2012. 'Disposizioni urgenti in materia di semplificazione e di sviluppo'*, G.U. n.33 del 9 febbraio 2012 - Supplemento Ordinario n.27, <http://www.governo.it>.

D.Lgs

- 2012 *n.151 24 gennaio 2012. 'Disposizioni urgenti per la concorrenza, lo sviluppo delle infrastrutture e la competitività'*, G.U. n.71 del 24 marzo 2012 - Supplemento Ordinario n.53, <http://www.lavoro.gov.it>.

D.Lgs.

- 2012 *n.152 del 3 aprile 2006, e ss.mm.ii. 'Norme in materia ambientale'*, G.U. n.88 del 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n.96, <http://www.camera.it>.

D.M.

- 2012a *7 novembre 2008. 'Disciplina delle operazioni di dragaggio nei siti di bonifica di interesse nazionale'*, G.U. n.284 del 4 dicembre 2008, <http://www.ram.minambiente.it>.
- 2012b *del 24 gennaio 1996. 'Direttive inerenti le attività istruttorie per il rilascio delle autorizzazioni di cui all'art. 11 della legge 10 maggio 1976, n.319 e successive modifiche ed integrazioni, relative allo scarico nelle acque del mare o in ambienti ad esso contigui, di materiali provenienti da escavo di fondali di ambienti marini o salmastri o di terreni litoranei emersi, nonché da ogni altra movimentazione di sedimenti in ambiente marino'*, G.U. n.31 del 7 febbraio 1996, <http://www.ram.minambiente.it>.
- 2012c *n.367 del 6 novembre 2003. 'Regolamento concernente la fissazione di standard di qualità nell'ambiente acquatico per le sostanze pericolose, ai sensi dell'art. 3, comma 4, del D.Lgs. 11 maggio 1999, n.152'*, G.U. n.5 del 8 gennaio 2004, <http://www.ambientediritto.it>.

- 2012d *n.56 del 14 aprile 2009. 'Criteri tecnici per il monitoraggio dei corpi idrici e l'identificazione delle condizioni di riferimento per la modifica delle norme tecniche del D.Lgs. del 3 aprile 2006, n.152, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell'articolo 75, comma 3, del D.Lgs. medesimo'*, G.U. n.124 del 30 maggio 2009 - Supplemento Ordinario n.83, <http://www.normattiva.it>.

D.P.R.

- 2012 *n.816 del 26 aprile 1977. 'Fissazione delle linee di base del mare territoriale'*, G.U. n.305 del 9 Novembre 1977, <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it>.

Favaretti, M. e A. Mazzucato

- 1989 *Prove geotecniche di laboratorio*, CLEUP, Padova, (IT).

ICRAM-APAT

- 2007 *Manuale per la movimentazione dei sedimenti marini*, <http://www.minambiente.it>.

IMO

- 1996 *Protocollo per la prevenzione e l'eliminazione dell'inquinamento marino generato dallo scarico in mare di rifiuti e altre sostanze*, <http://www.imo.org>.
1997 *Linee guida specifiche per la sistemazione del materiale dragato*, <http://www.imo.org>.
2000 *Linee guida per la sistemazione di rifiuti o altro materiale che può essere scaricato*, <http://www.imo.org>.

L.

- 2012a *n. 179 del 31 luglio 2002. 'Disposizioni in materia ambientale'*, G.U. n. 189 del 13 Agosto 2002, <http://www.minambiente.it>.
2012b *n.319 del 10 maggio 1976 e ss.mm.ii. 'Norme per la tutela delle acque dall'inquinamento'*, G.U. n.141 del 29 maggio 1976, <http://www.normattiva.it>.
2012c *n.84 del 28 gennaio 1994. 'Riordino della legislazione in materia portuale'*, G.U. n.28 del 4 febbraio 1994 - Supplemento Ordinario n. 1, <http://www.normattiva.it>.
2012d *n.979 del 31 dicembre 1982. 'Disposizioni per la difesa del mare'*, G.U. n.16 del 18 gennaio 1983 - Supplemento Ordinario, <http://www.pcn.minambiente.it>.

Ludwig, Daniel D. e Joseph H. Sherrard

- 1988 *An evaluation of the standard elutriate test as an estimator of contaminant release at the point of dredging*, Contract report, U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC, (U.S.A.)

Min.Ambiente

- 2012 *Entrata in vigore del D.L. del 9 febbraio 2012, n. 5 - 'Disposizioni urgenti in materia di semplificazione e di sviluppo' - Art. 24, 'Modifiche alle norme in materia ambientale di cui al D.Lgs. del 3 aprile 2006, n.152'*.

Montevecchi, Ing. Massimo

- 2005 *Aspetti tecnici e ambientali dei dragaggi*, Ravenna.

Palermo, Dr. Michael, Paul R. Schroeder *et al.*

- 2008 *Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments*, Final report, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, (MS).

Protocollo

- 1996 *alla Convenzione di Londra*, <http://documenti.camera.it>.

Rollings, Dr. Marian P.

- 2000 *Geotechnical considerations in contained aquatic disposal design*, DOER Technical Notes Collection, ERDC TN-DOER-N5, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, (MS), <http://www.wes.army.mil/el/dots/doer/>.

Smits, Jos

- 1998 *Machines, Methods and Mitigation*, Environmental Aspects of Dredging, 4, CEDA, 2601 DD Delft, (NL).

Tomasicchio, Ugo

- 2011 *Manuale di ingegneria portuale e costiera*, HOEPLI, Milano.

UNEP-MAP

- 1995a *Protocollo per la prevenzione e l'eliminazione dell'inquinamento nel Mar Mediterraneo prodotto dagli scarichi effettuati da navi e aeromobili o da incenerimento in mare*, <http://www.unepmap.org>.
1995b *Protocollo per la protezione dell'ambiente marino e delle regioni costiere del Mediterraneo*, <http://www.unepmap.org>.
2005 *Linee guida per la movimentazione di materiali geologici inerti e incontaminati*, <http://www.unepmap.org>.

Vanderostyne, Mon e Marsha Cohen

- 1999 «From Hand-drag to Jumbo: A Millennium of Dredging», *Terra et Acqua*, 77, a cura di Marsha R. Cohen, IADC.